



Tipo Documento: Relazione VO Condizione n.9

Codice documento: IMAG-70-A53-30-ARP00002-00

Rev. n. 00

Pagina - di -

Centrale di Cassano d'Adda: Impianto motori a gas
Realizzazione di studi paleosismologici per la verifica di possibili superfici di rottura nei terreni superficiali riconducibili a dislocazioni per effetto dell'attività della faglia capace ID 87009 del database ITHACA nel sito della Centrale Termoelettrica A2A di Cassano d'Adda (MI)

Verifica di ottemperanza alla condizione ambientale n.9 del Parere n.92 del 26/04/2021 allegato al provvedimento di VIA n. 321 del 03/08/2021

APPLICA

A2A/DGE/BGT/GEN/ING

LISTA DI DISTRIBUZIONE

A2A/DGE/BGT/GEN/ING

AGG/AMD/ICA



EMISSIONE					
0	Maggio 2022	Emissione per VO	E. Falcucci – S. Gori	A2A	E. Falcucci – S. Gori
REV	DATA	DESCRIZIONE	REDAZIONE	VERIFICA	APPROVAZIONE

- Il documento approvato e firmato in originale è depositato presso l'archivio tecnico della S.O.-

Questo documento è proprietà del Gruppo A2A: non può essere utilizzato, trasmesso a terzi o riprodotto senza autorizzazione della stessa. Il Gruppo A2A tutela i propri diritti a norma di legge
 Questo documento è stato predisposto da TAUW Italia s.r.l.: non può essere utilizzato, trasmesso a terzi o riprodotto senza autorizzazione della stessa. TAUW Italia s.r.l. tutela i propri diritti a norma di legge

REALIZZAZIONE DI STUDI PALEOSISMOLOGICI PER LA VERIFICA DI POSSIBILI SUPERFICI DI ROTTURA NEI TERRENI SUPERFICIALI RICONDUCEBILI A DISLOCAZIONI PER EFFETTO DELL'ATTIVITÀ DELLA FAGLIA CAPACE ID 87009 DEL DATABASE ITHACA NEL SITO DELLA CENTRALE TERMOELETTRICA A2A DI CASSANO D'ADDA (MI)



Responsabili dello studio

Dott.Geol. Emanuela Falcucci

Dott. Geol. Stefano Gori

Con la collaborazione del

Dott. Fabrizio Galadini

Ordine per l'esecuzione delle attività necessarie alla predisposizione dello studio paleosismologico in ottemperanza alla condizione ambientale 9 del Parere CT VIA n.92 del 26/04/2021 allegato al Decreto VIA del MITE n.321 del 03/08/2021 relativa al progetto "Centrale termoelettrica A2A gencogas S.p.A. di Cassano d'Adda: impianto motori a gas

Indice

1. INTRODUZIONE, **p. 2**
 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMOTETTONICO DELL'AREA, **p. 6**
 3. IL DATABASE ITHACA E LA FAGLIA CAPACE (ID 87009) NELL'AREA DEL SITO DI INTERESSE, **p. 9**
 4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA, **p. 11**
 5. ASSETTO STRATIGRAFICO LOCALE DELL'AREA, **p. 14**
 6. INDAGINI CONDOTTE PER IL PRESENTE STUDIO, **p. 15**
 - 6.1 Analisi geomorfologica areale e locale, **p. 15**
 - 6.2 Indagine paleosismologica, **p. 22**
 - 6.2.1 Analisi stratigrafica, **p. 24**
 - 6.2.2 Analisi stratimetrica in prospettiva geologico-strutturale, **p. 28**
 - 6.3 Prospezioni geoelettriche, **p. 30**
 - 6.3.1 Risultati analitici, **p. 31**
 7. DISCUSSIONE DEI RISULTATI, **p. 33**
 - 7.1 Analisi delle informazioni disponibili circa la presenza della faglia capace n. 87009 del database ITHACA, **p. 33**
 - 7.2 Analisi delle informazioni geologiche, geomorfologiche, paleosismologiche e geofisiche del presente studio, **p. 35**
 8. CONCLUSIONI OPERATIVE, **p. 36**
- BIBLIOGRAFIA
- MATERIALE AUSILIARIO

1. INTRODUZIONE

La revisione critica della letteratura mondiale sul tema della definizione di “faglia attiva e capace” per scopi ingegneristici effettuata da Galadini et al. (2012), fra la quale gli studi relativi alla realizzazione di impianti nucleari dell’*International Atomic Energy Agency* (IAEA, 2010), permette di definire dei limiti cronologici (intesi come periodo di tempo dal presente) entro i quali una faglia deve mostrare evidenze di attività per essere definita come attiva e capace, sulla base di criteri propriamente geologici e criteri operativi, in funzione del regime tettonico in atto nei diversi settori della penisola italiana.

Le definizioni ad oggi comunemente usate nel quadro normativo italiano vigente di “*faglia attiva*” e “*faglia attiva e capace*” (da qui in poi chiamata FAC) sono quelle che vengono proposte dalle “Linee Guida per la gestione del territorio in aree interessate da faglie attive e capaci” (da qui in poi chiamate Linee Guida FAC), promulgate dal Dipartimento della Protezione Civile Nazionale (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015). Tali Linee guida definiscono che:

“In accordo con quanto stabilito negli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (Gruppo di lavoro MS, 2008), è considerata attiva una faglia che si è attivata almeno una volta negli ultimi 40.000 anni (parte alta del Pleistocene superiore-Olocene), ed è considerata capace una faglia attiva che raggiunge la superficie topografica, producendo una frattura/dislocazione del terreno. Questa definizione si riferisce al piano di rottura principale della faglia (piano su cui avviene la maggiore dislocazione)”.

Il sito di interesse del presente lavoro, in cui è ubicata la centrale termoelettrica **a2a**, si colloca nei pressi dell’abitato di Cassano d’Adda, poco a est della città di Milano. La presenza di strutture tettoniche ad attività quaternaria in un ampio settore di territorio lombardo orientale è documentata dalla letteratura scientifica disponibile, prevalentemente basata su dati geofisici di sottosuolo e informazioni geologiche. Trattasi di faglie a cinematica prevalentemente inversa la cui formazione ed attività è legata al regime tettonico compressivo che interessa questa regione e che sono considerate responsabili della sismicità storica e strumentale dell’area. Il sito della centrale termoelettrica ricade infatti in una regione interessata da eventi sismici avvenuti in tempi storici di magnitudo medio-alta (e.g. Stucchi et al., 2008; Rovida et al., 2022), con zone di risentimento ampie diverse decine di km attorno alle aree epicentrali.

Le sopra menzionate Linee guida FAC non propongono riferimenti temporali diversi per i regimi tettonici in atto nel territorio italiano per la definizione di una faglia come attiva e capace, in relazione quindi alle diverse cinematiche delle strutture tettoniche. Diversamente, per ciò che attiene il regime tettonico compressivo, Galadini et al. (2012) propongono che una faglia inversa debba essere

considerata attiva e capace se questa mostra evidenze di attività nel Quaternario (ovvero negli ultimi 2.6 Ma), a meno che la faglia non sia “sigillata” da depositi o morfologie non più recenti dell’Ultimo Massimo Glaciale, ovvero non più recenti di circa 20.000 anni dal presente.

Date queste premesse, il presente studio ha l’obiettivo di verificare la presenza di una struttura tettonica attiva e capace in corrispondenza del sito della centrale termoelettrica **a2a**, in ottemperanza di quanto previsto dalla “*Procedura di valutazione d’impatto ambientale ai sensi dell’art. 23 ss. del D.Lgs 152/2006 e ss.mm.ii. - Centrale termoelettrica di Cassano d’Adda (MI): impianto motori a gas - ID_VIP: 4907*”, della Commissione Tecnica di Verifica dell’Impatto Ambientale – VIA e VAS, che ha ravvisato quanto segue:

“L’esame del database ITHACA evidenzia tuttavia la presenza della faglia capace ID 87009 <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/SchedaFaglia.aspx?faultcode=87009> con direzione NNE-SSW ed emergenza circa 300 m ad Ovest del sito di progetto. Considerato che il database ITHACA, come noto, raccoglie le informazioni di letteratura fornite da studi a valenza regionale e di variabile attendibilità, bassa nel caso della faglia indicata, risulta opportuno verificare in occasione degli scavi di progetto l’eventuale presenza di superfici di rottura nei terreni superficiali riconducibili a dislocazioni per effetto dell’attività di detta faglia capace, accertamento da eseguirsi, alla scala di dettaglio richiesta dal progetto, attraverso studi paleosismologici”,

E ancora:

“Verificata nel database ITHACA la presenza a ridotta distanza dal sito della centrale della faglia capace con ID 87009, sarà necessario verificare attraverso studi paleosismologici l’eventuale presenza, pur ritenuta improbabile, di superfici di rottura nei terreni superficiali riconducibili a detta faglia”.

Il presente studio ha dunque l’obiettivo di valutare, come da prescrizione sopra riportata, attraverso l’applicazione di metodologie tipiche dell’indagine “paleosismologica”, la presenza di elementi strutturali fragili e dislocazioni superficiali riferibili all’attività di una struttura attiva e capace di origine tettonica (quindi, non riferibili a fattori non tettonici, legati a processi di tipo geotecnico, come cedimenti differenziali, espandimenti laterali, deformazioni di tipo “*soft sediment*”, o a processi di natura gravitativa), segnatamente alla sopracitata faglia capace ID 87009 riportata dal database ITHACA (ITHACA Working Group, 2019) dell’Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca

Ambientale, cui dettagli informativi verranno descritti ed analizzati di seguito, in un paragrafo dedicato, dopo alcuni capitoli introduttivi al contesto sismotettonico dell'area (Fig. 1a, b, c).

Va specificato che la traccia della faglia capace riportata nel database ITHACA non attraversa specificatamente l'area della centrale termoelettrica ma è ubicata in un settore poco a ovest di questa (Fig. 1c).

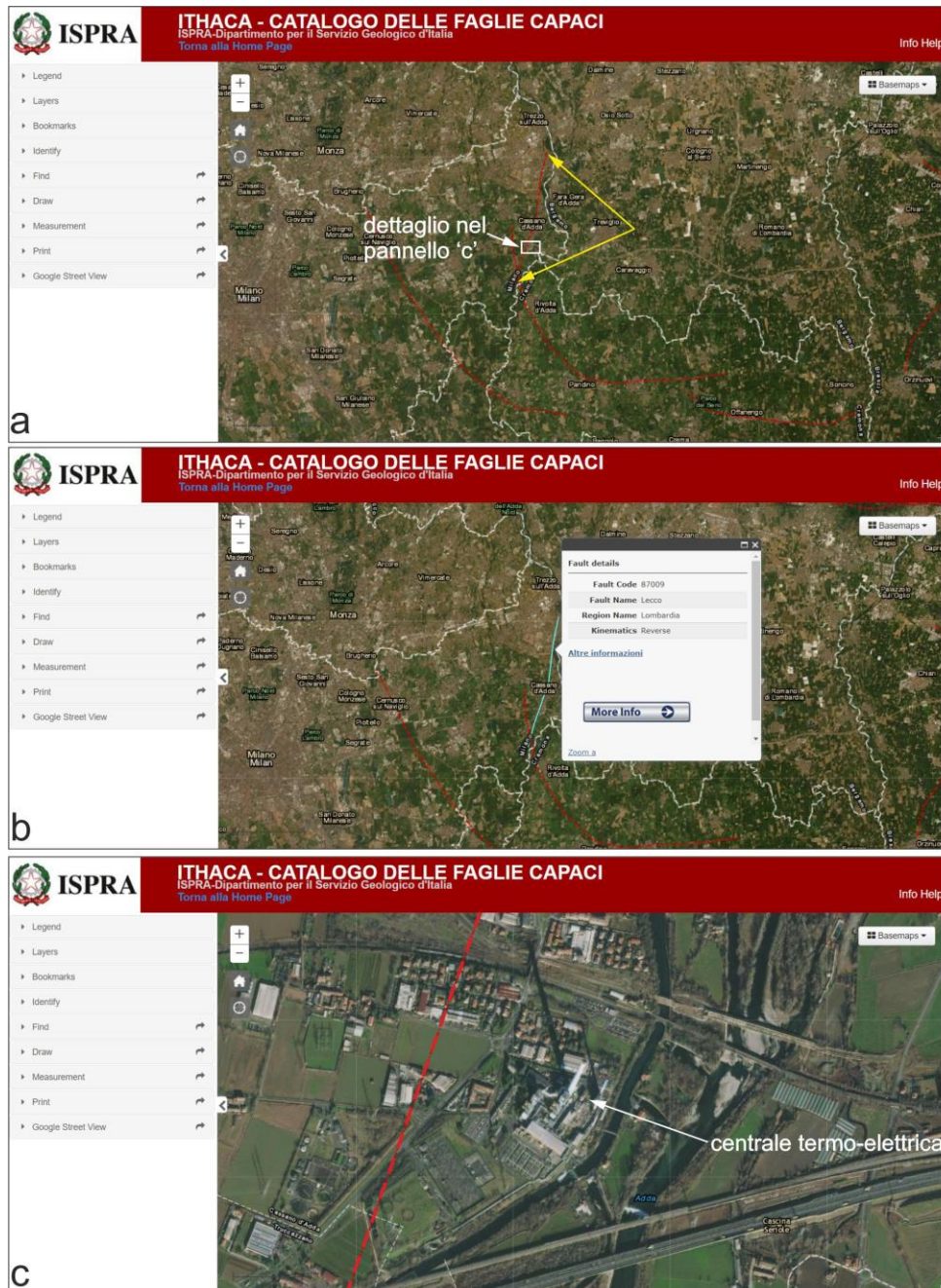


Fig. 1. a, b: Stralcio di immagine satellitare estratta dal database ITHACA in cui è riportata la traccia della faglia capace ID 87009 (linea tratteggiata rossa in 'a', linea celeste in 'b'). c: dettaglio della zona della centrale termoelettrica di Cassano d'Adda, con la traccia della faglia oggetto di studio (linea tratteggiata rossa).

Tuttavia, come si vedrà in seguito, la scala cartografica di rappresentazione della faglia capace sul database ITHACA non permette di escludere a priori la presenza di questa specificatamente in corrispondenza del sito oggetto di studio.

L'obiettivo del presente lavoro è perseguito mediante l'applicazione di un approccio multi-metodologico che consente di ottenere il grado massimo di approfondimento conoscitivo per la valutazione della presenza di faglie capaci negli studi di Microzonazione Sismica del territorio nazionale. Su questo argomento, infatti, le succitate Linee Guida FAC definiscono quattro gruppi di indagini, indicati come "Ind_1", "Ind_2", "Ind_3" e "Ind_4" (Fig. 2), con significatività crescente da 1 a 4, per la valutazione della capacità di una faglia. Il primo gruppo di indagini prevede l'analisi aerofotogrammetrica (analisi di foto aeree, ortofoto, immagini LiDAR, immagini da satellite, modelli digitali di terreno); il secondo gruppo di indagini prevede rilievi geologici e geomorfologici di campagna; il terzo gruppo di analisi prevede indagini geofisiche e geognostiche (mediante ERT, sismica a riflessione e rifrazione, GPR, sondaggi e saggi); il quarto e più approfondito livello di indagini prevede l'analisi paleosismologica, da eseguire mediante l'esecuzione e analisi di trincee paleosismologiche e datazioni cronometriche dei terreni. Per gli studi di Microzonazione Sismica di Terzo livello, ovvero il livello massimo di approfondimento, l'indagine paleosismologica (Ind_4) è imprescindibile per l'analisi della capacità di una faglia.

ID	GRUPPO INDAGINI	INDAGINI
Ind_1	Analisi aerofotogrammetriche	Foto aeree, ortofoto, immagini LiDAR, immagini da satellite
Ind_2	Rilievi geologici e geomorfologici	Rilevamenti di campagna e relativa cartografia
Ind_3	Indagini geofisiche e geognostiche	ERT, sismica a riflessione e rifrazione, GPR, sondaggi e saggi
Ind_4	Paleosismologia	Trincee paleosismologiche e datazioni cronometriche dei terreni fagliati

Tabella A2 → Indagini per lo studio di una FAC, raggruppate per tipologia e significatività (Gruppo Ind_4 massima significatività).

Fig. 2. Estratto dalle Linee Guida FAC, relative alle indagini necessarie per il massimo livello di approfondimento di una FAC.

L'applicazione dell'analisi paleosismologica mediante la realizzazione di scavi geognostici attraverso la possibile traccia di una faglia capace è peraltro considerata indagine imprescindibile anche per i succitati studi relativi alla realizzazione di impianti nucleari (IAEA, 2010).

Dopo l'analisi critica delle informazioni geologiche, geomorfologiche e sismotettoniche disponibili per l'area di studio, lo studio prevede osservazioni aerofotogeologiche, nonché la realizzazione di indagini paleosismologiche (analisi delle pareti di uno scavo geognostico) nel sito di interesse, allo scopo di verificare la presenza di possibili evidenze di dislocazioni o rotture di terreni associabili all'attività di una faglia capace. Le indagini paleosismologiche sono coadiuvate da indagini

geofisiche, segnatamente prospezioni geoelettriche di resistività, al fine di confrontare l'assetto geologico-stratigrafico sub-superficiale derivato dall'indagine paleosismologica con quello, indiretto, di sottosuolo ricavato dall'indagine geofisica.

I dati così ottenuti vengono quindi analizzati e discussi nell'ottica di chiarire la presenza o l'assenza di una faglia capace nel sito di interesse.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMOTETTONICO DELL'AREA

L'area oggetto del presente studio, situata poco a est della città di Milano, si colloca in corrispondenza del fronte sudalpino lombardo, costituito da strutture tettoniche inverse e *thrust* a vergenza meridionale, la cui formazione è il risultato del regime tettonico compressivo che interessa l'area padana a partire dal Cretaceo, legato alla convergenza delle placche europea e africana e della microplacca Adria (e.g. Scardia et al., 2014; Vannoli et al., 2015, e bibliografia citata). Tale convergenza ha determinato, appunto, la formazione di strutture tettoniche compressive sepolte al di sotto dei sedimenti marini e continentali della Pianura Padana. Le evidenze geologiche e geofisiche mostrano che alcune di queste strutture, il cui inviluppo costituisce un fronte compressivo orientato in direzione prevalentemente E-O e senso di movimento N-S, sono responsabili della deformazione di sedimenti pliocenico-quadernari, testimoniandone l'attività nel corso delle ultime centinaia di migliaia di anni (e.g. Castaldini e Panizza, 1991; Casero, 2004; Giardina et al., 2004; Livio et al., 2009; Scardia et al., 2014).

Il settore compreso fra la zona di Milano, Brescia e l'area gardesana è stata sede di diversi eventi sismici, che sono il risultato degli sforzi tettonici in atto, con terremoti di $M_w > 5.5$ (es. 1117, Veronese; 1222, Brescia; 1901, Salò) e vari eventi con M_w compresa fra 4.8 e 5.5 (es., 1065, Brescia; 1396, Monza; 1642, Bergamo) (Stucchi et al., 2008; Rovida et al., 2022). Per molti degli eventi sismici fino al 1700, la determinazione epicentrale e l'attribuzione della magnitudo sono da considerarsi con una certa cautela al fine di definire le caratteristiche sismiche del territorio, a causa delle limitate fonti storiche. I terremoti del 1117 e del 1222, in tale contesto, rappresentano un'eccezione rispetto ai dati generalmente disponibili. E tuttavia vari problemi tuttora aperti rendono assai difficile l'utilizzo della distribuzione del danno attribuibile a questi eventi nella prospettiva di un'affidabile parametrizzazione.

Le conoscenze geologico-strutturali e di geologia del Quaternario permettono di formulare ipotesi sismotettoniche relative all'origine dei terremoti dell'area, la maggior parte dei quali sono associati all'attivazione di alcune delle principali faglie inverse e *thrust* che interessano l'area (e.g. Castaldini e Panizza, 1991; Scardia et al., 2014) (Fig. 3a), che per la maggior parte dei casi risultano essere

sorgenti sismogenetiche cieche, ovvero non affiorano in superficie (e.g. Vannoli et al., 2015) (Fig. 3b).

Secondo il Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane (DISS; Basili et al., 2008; DISS Working Group, 2021), l'area oggetto di studio si colloca in corrispondenza di alcune sorgenti sismogenetiche associate al fronte compressivo attivo subalpino quali, a esempio, le sorgenti sismogenetiche composite chiamate ITCS002 “Western S-Alps external thrust deep” e ITCS115 “Western S-Alps external thrust shallow-west”, alla quale è associata una sorgente sismogenetica individuale chiamata ITIS104 “Romanengo” (Fig. 3b), che gli autori considerano come causativa dell'evento sismico del 1802 (M_w 5.6; Rovida et al., 2022) (Fig. 4).

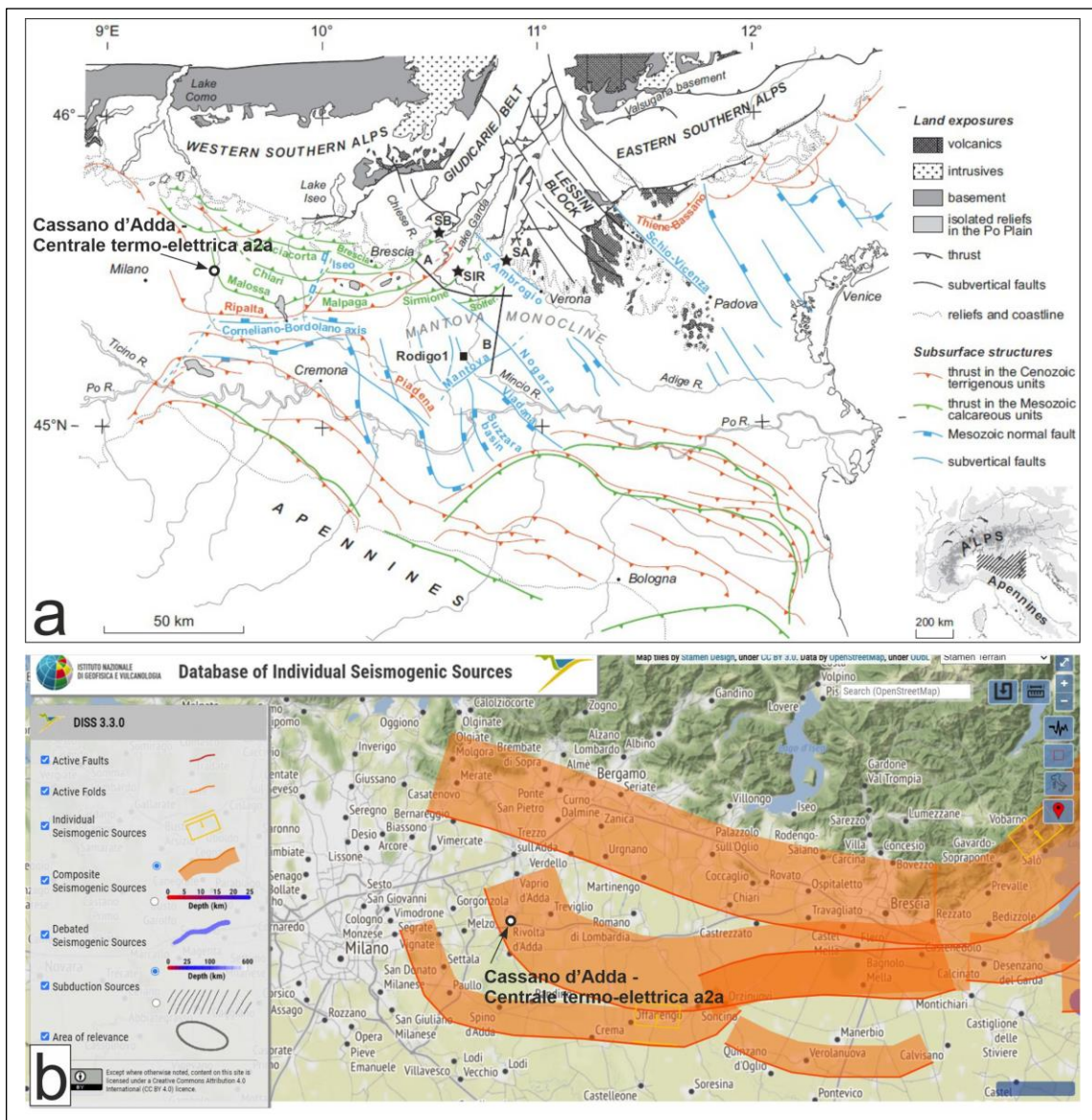


Fig. 3. a: Schema strutturale della Pianura Padana centro-orientale (da Scardia et al., 2014). b: estratto dal database DISS, in cui sono riportate le sorgenti sismogenetiche dell'area in esame secondo gli autori.

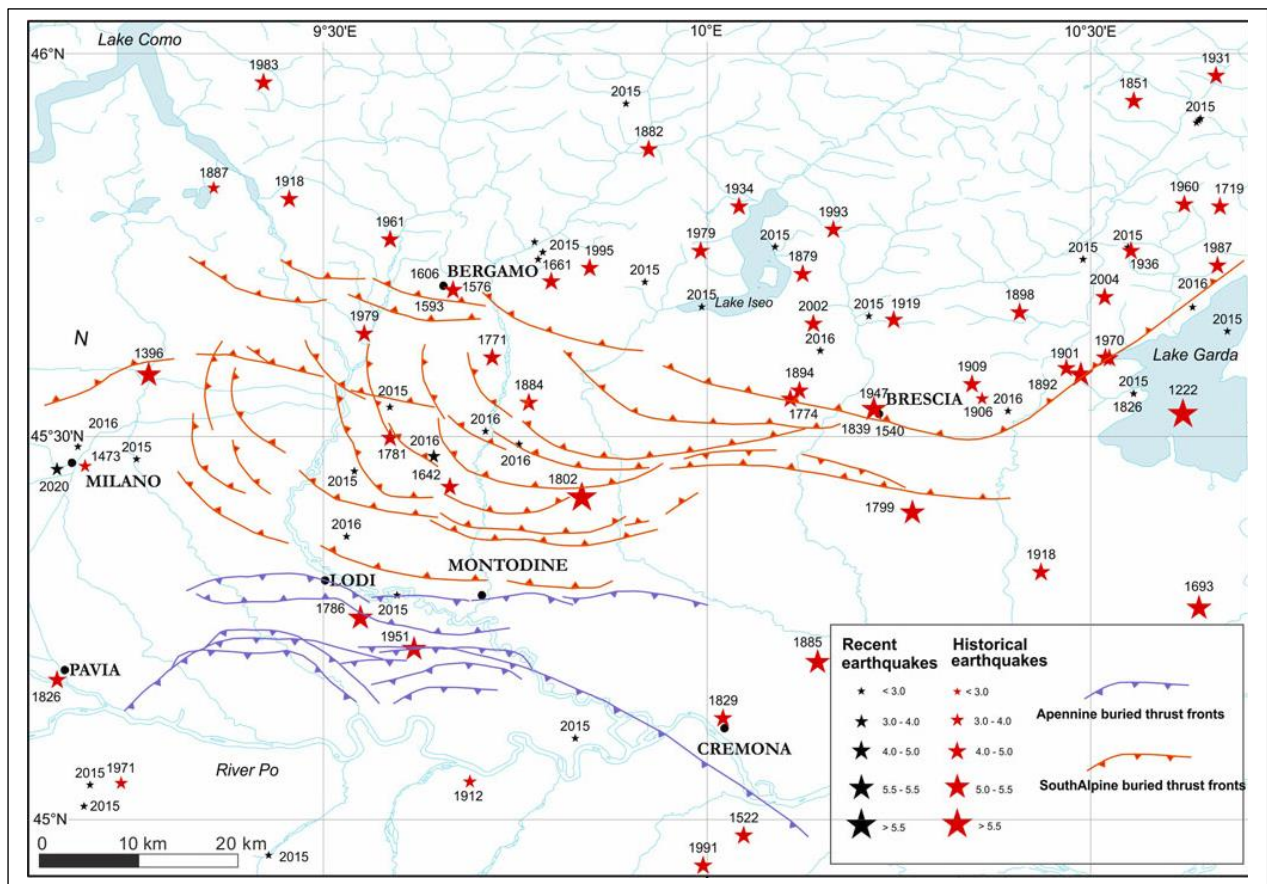


Fig. 4. Schema strutturale della Pianura Padana centrale ed epicentri dei principali eventi sismici storici (da Zanchi et al., 2021 e bibliografia citata).

3. IL DATABASE ITHACA E LA FAGLIA CAPACE NEL SITO DI INTERESSE

Il database ITHACA indica la presenza di una faglia capace a cinematica inversa nell'area a ridosso del sito della centrale termoelettrica, indicata nel database col codice identificativo ID 87009. Di seguito sono riportati i dettagli conoscitivi della scheda analitica che descrivono l'elemento tettonico (Fig. 5):

- La struttura tettonica è chiamata “faglia di Lecco”, appartenente al “sistema di faglie di Lecco”. Alla faglia è attribuito il rango “**Primary**”: secondo quanto indicato nel database, la terminologia utilizzata fa riferimento al glossario IAEA (2010), che riporta la definizione di “*Earthquake effects, primary*”, ovvero “*The surface expression of seismogenic tectonic source (including surface faulting, surface uplift and subsidence). Primary effects gave place to characteristic tectonic landforms (e.g. fault scarps, pressure ridges) and eventually, particular landforms assemblages of seismic origin (i.e. seismic landscapes)*”.
- La tabella indica che la faglia ha orientazione media N315°, ovvero a orientazione NNO-SSE. Tuttavia, la traccia in pianta della struttura tettonica, così come cartografata sul database, ha evidente orientazione NNE-SSO.
- Alla “faglia di Lecco” viene associata una lunghezza in superficie di 11.8 km. Questa è cartografata alla scala 1:500.000, ovvero con un'accuratezza e dettaglio di ubicazione e rappresentazione piuttosto ridotti.
- Non sono definiti parametri geometrici della faglia quali direzione di immersione e inclinazione.
- Per ciò che riguarda l'età dell'ultima attivazione, ITHACA indica un generico Pleistocene.
- Non viene indicato alcuno parametro cinematico associato alla struttura.
- La qualità dello studio è definita dai compilatori come bassa.
- Le evidenze sulle quali viene riportata tale faglia capace sono di natura geomorfologica.

- Il database fa riferimento a due pubblicazioni scientifiche a supporto della presenza di questa struttura tettonica, che sono il lavoro di Giardina et al. (2004) e il Modello Strutturale d'Italia (AA.VV., 1983).

GENERAL IDENTIFICATION			
Fault Code	87009		
Fault Name	Lecco		
Region Name	Lombardia		
Tectonic Environment	ND		
System Name	Lecco		
Synopsis			
Rank	Primary		
GEOMETRY AND KINEMATICS			
Segmentation	Single Segment		
Average Strike (°)	315		
Dip (°)	Undefined		
Dip Direction			
Fault Length (km)	11.8		
Mapping Scale	1:500000		
Fault Depth (m)			
Kinematics	Reverse		
ACTIVITY			
Surface Evidence	ND		
Last Activity	Pleistocene generic		
Applied Technique	Geomorphologic data		
SLIP PARAMETERS			
Recurrence Interval (yr)			
Slip Rate (mm/yr)			
Max Credible Rupture Length (km)			
Max Credible Slip (m)			
Time Since Last Event (yr)			
Max Known Magnitude (Mw)			
Max Known Intensity (MCS)			
Known Seismic Events			
FINAL REMARKS			
Capability Consensus			
Study Quality	LOW		
Notes			
Fault Trace Reference			
Last Update			
REFERENCES			
Authors	Title	Reference	Year
GIARDINA F., MICHETTI A.M., SERVA L., DOGLIONI C. (2004)	The seismic potential of the Insubria Region (Southern Alps): insights from topographic and rheological modeling	Boll.Geof.Teor.Appl., 45, Suppl. 1, 86-91	2004
AA.VV. (1983)	Structural Model of Italy.	"Quaderni " "La Ricerca Scientifica"", 114 (3), 6 Fogli, CNR-PFG, Sottoprogetto Modello Strutturale Tridimensionale, Roma."	

Fig. 5. Scheda descrittiva del database ITHACA relativa alla faglia capace ID 87009

4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

Il territorio di Cassano d'Adda corrisponde all'ambito geomorfologico alluvionale relativo alla parte intermedia del Fiume Adda. Come indicato nel Piano di Governo del Territorio (PGT) della città di Cassano d'Adda (Fig. 6a), in accordo con quanto riportato sulla Carta Geologica d'Italia (scala 1:100.000) Foglio 46 "Treviglio" (Fig. 6b), l'assetto geomorfologico dell'area comunale è caratterizzato da due ambiti distinti, uno associato alla piana alluvionale attuale del fiume, un altro ad un ambito di terrazzo fluviale, separato dalla piana attuale da scarpate fluviali immergenti per lo più verso est.

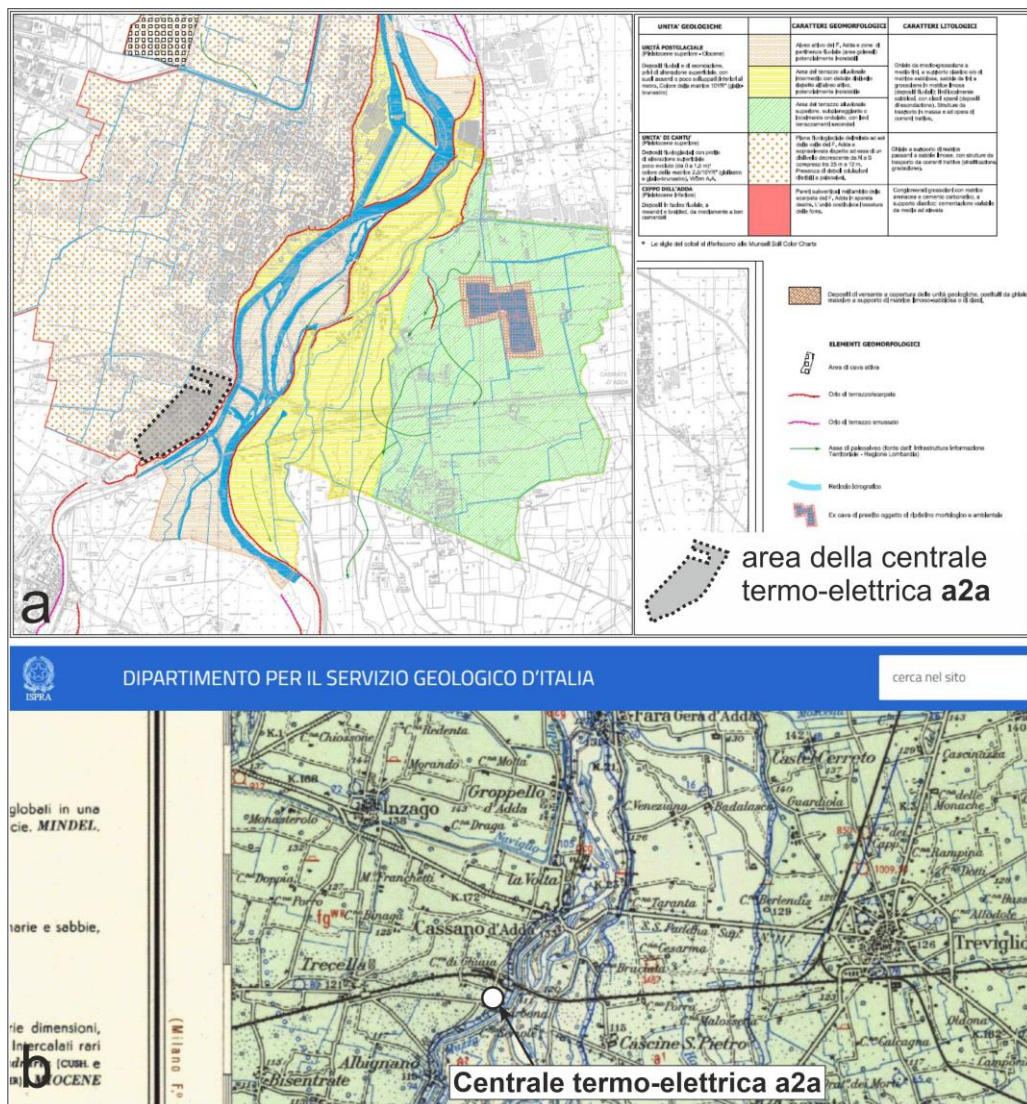


Fig. 6. a: Stralcio del Piano di Governo del Territorio di Cassano d'Adda. b: Stralcio della Carta Geologica d'Italia (scala 1:100.000), Foglio 46 "Treviglio".

Il primo ambito geomorfologico occupa il settore orientale del territorio comunale e risulta delimitato a ovest da una scarpata ad andamento N-S e NE-SO. Il fiume, lungo tutto il suo corso, è regolato da opere di regimazione antropiche, che oltre ad avere un effetto stabilizzante sulle portate di deflusso, hanno dato origine a canali artificiali utilizzati per scopi idroelettrici, irrigui ed industriali.

L'abitato principale e il sito della centrale termoelettrica **a2a** sono posti nel secondo ambito geomorfologico in quanto sorgono su un terrazzo sospeso sulla piana attuale, al quale si fa riferimento come "piana fluvioglaciale", che si caratterizza per una morfologia pianeggiante con deboli ondulazioni riferibili a paleoalvei. Questo terrazzo è separato dalla piana alluvionale del fiume Adda da una scarpata alta alcuni metri. Il sito della centrale è posto a ridosso dell'orlo di questo terrazzo.

In termini geologici, il succitato PGT indica che il terrazzo fluvioglaciale sottende un corpo sedimentario riferibile alla cosiddetta "Unità di Cantù". Questa corrisponde a depositi fluvio-glaciali relativi Pleistocene Superiore (e.g. Zuffetti e Bersezio, 2020) (Fig. 7a), in particolare all'Ultimo Massimo Glaciale (e.g. Ravazzi et al., 2018) (Fig. 7b), ovvero di età compresa fra i 25.000 e i 15.000 anni prima del presente.

Nello specifico, tale unità stratigrafica è costituita da ghiaie con ciottoli arrotondati a supporto di clasti o di matrice, con matrice in genere sabbiosa e sabbie spesso a laminazione incrociata. Grossolanamente stratificati, costituiscono corpi lenticolari o stratoidi, spesso con strutture interne quali gradazioni inverse o normali, embricature dei ciottoli, cluster e laminazione incrociata. La litologia dei ciottoli e clasti che costituiscono il deposito è rappresentata da rocce intrusive acide, intrusive basiche, filoniane, vulcaniti, metamorfiche (prevalentemente gneiss), rocce terrigene a cemento carbonatico e siliceo, calcari, dolomie e selci (Carta geologica della Provincia di Bergamo, 2000).

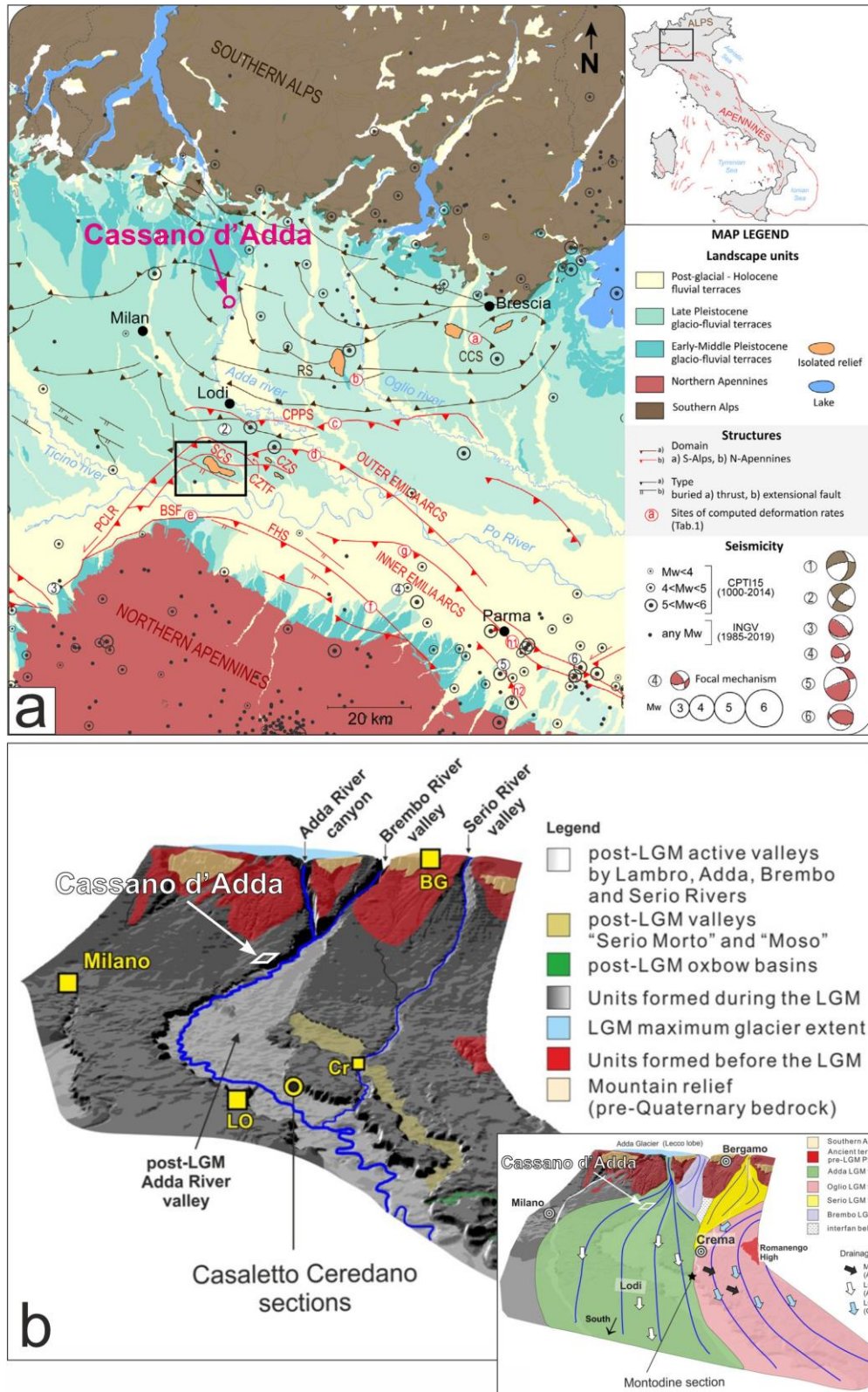


Fig. 7. a: Quadro strutturale e della sismicità della Pianura Padana centrale (da Zuffetti e Bersezio, 2020). b: Modello digitale di terreno e schema morfo-stratigrafico del settore compreso fra i fiumi Adda, Brembo e Serio (da Ravazzi et al., 2018); nell'inserto è riportata la ricostruzione del paleo-drenaggio relativo all'Ultimo Massimo Glaciale (da Zanchi et al., 2021).

5. ASSETTO STRATIGRAFICO LOCALE DELL'AREA

Le indagini geologiche e geognostiche disponibili, eseguite nel corso degli ultimi anni da parte dello studio GEODRILL s.r.l. – Dott. Geol. Marco Belloli, permettono la caratterizzazione dell'assetto geologico di sottosuolo dell'area della centrale **a2a**. Sono stati effettuate diverse tipologie di indagini, sia geognostiche, sia geotecniche che geofisiche, a partire dagli anni '90 dello scorso secolo. Tutte hanno mostrato che il sito sorge al di sopra di una sequenza stratigrafica rappresentata da depositi alluvionali, costituiti sostanzialmente da alternanze di strati di ghiaie e sabbie in eteropia fra loro, coerentemente con l'assetto geologico generale dell'area sopra descritto. Specificatamente, tutti i sondaggi geognostici realizzati hanno attraversato esclusivamente la sequenza alluvionale che si estende almeno per tutta l'area della centrale; tale sequenza risulta coperta esclusivamente da terreni di riporto, costituiti da accumuli di materiale ghiaioso e sabbioso contenente abbondanti frammenti di origine antropica, di spessore variabile fra 1-2 m e 7-8 m fra le diverse aree della centrale (Fig. 8). Quindi, le indagini geognostiche locali mostrano la continuità laterale della sequenza stratigrafica alluvionale nell'area oggetto dello studio.

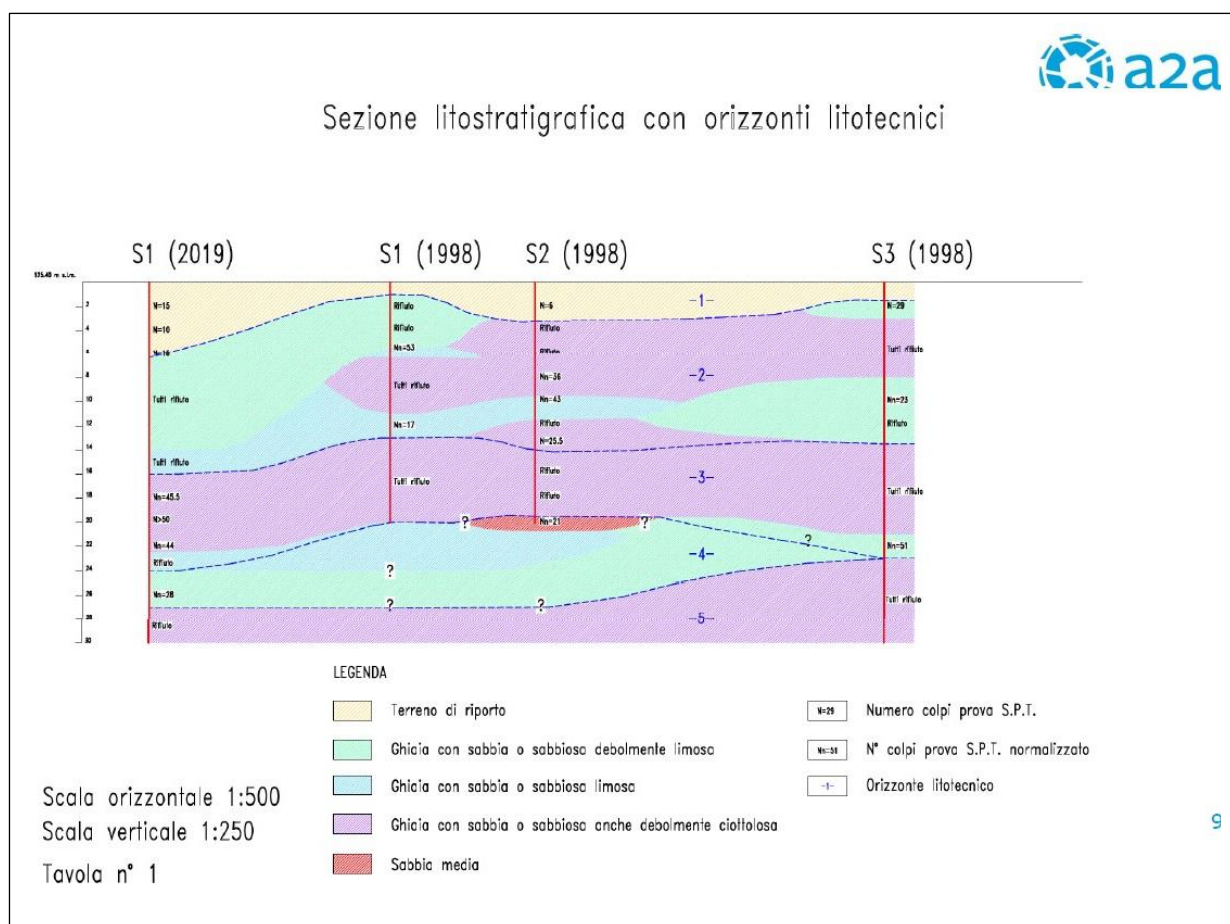


Fig. 8. Ricostruzione stratigrafica dell'area della centrale a2a da dati di sondaggio, eseguita da studio GEODRILL s.r.l. – Dott. Geol. Marco Belloli.

6. INDAGINI CONDOTTE PER IL PRESENTE STUDIO

6.1 Analisi geomorfologica areale e locale

In prima analisi, sono state condotte indagini geomorfologiche nell'area della centrale **a2a**, sia a una scala ampia, in un settore di alcuni km nell'intorno del sito, sia a una scala locale, in corrispondenza dell'impianto. Tali indagini hanno avuto lo scopo di verificare la presenza di tracce geomorfologiche dell'attività di lungo termine di una faglia capace. In sostanza, l'attività di una faglia capace nel corso delle ultime decine o centinaia di migliaia di anni dovrebbe aver influenzato l'evoluzione geologica e geomorfologica della zona, le cui tracce sarebbero pertanto individuabili nel paesaggio.

A tale fine è stato analizzato il contesto geomorfologico dell'area dell'abitato di Cassano d'Adda che, come detto in precedenza, risulta collocato al di sopra di un terrazzo in riva destra del fiume Adda, riferito a una piana fluvio-glaciale che attualmente risulta, appunto, terrazzata e sospesa sul corso attuale del fiume. L'indagine geomorfologica e il confronto con la letteratura disponibile mostrano la presenza di un assetto geomorfologico del tutto simile anche in riva sinistra dell'Adda, in corrispondenza della zona di Treviglio. Anche in questo caso, infatti, è ben visibile una superficie terrazzata sospesa rispetto alla piana attuale del fiume Adda.

Come verrà descritto più avanti, la superficie del terrazzo è stata localmente alterata dall'attività antropica, legata allo sviluppo urbanistico della zona e per attività estrattive. Tuttavia, le indagini geomorfologiche e topografiche consentono di fare alcune osservazioni. In particolare, i terrazzi osservati in destra e sinistra idrografica dell'Adda mantengono uno stesso andamento generale di un'unica superficie terrazzata, mostrando una debole pendenza verso il quadrante meridionale (Fig. 9a), coerentemente con l'origine fluvio-glaciale relativa al fiume Adda dai quadranti settentrionali. Inoltre, dei profili topografici fatti attraverso il corso del fiume e comprendenti la zona dei terrazzi e della presunta traccia della faglia capace su modello digitale del terreno alla risoluzione di 10 metri (Tinitaly DEM, dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; <https://data.ingv.it/dataset/185#additional-metadata>) mostrano che i terrazzi si trovano a quote del tutto simili in sinistra e destra idrografica dell'Adda (Figg. 9b; 10a, b). Ciò suggerisce che si tratti dello stesso ordine di terrazzo e che non ci sia stata dislocazione dell'elemento geomorfologico ad opera di una faglia capace almeno a partire dalla sua formazione. Tenendo in considerazione quanto riportato sul PGT e sulla Carta geologica della Provincia di Bergamo (2000), è ragionevole ipotizzare l'assenza di dislocazione almeno a partire dall'Ultimo Massimo Glaciale.

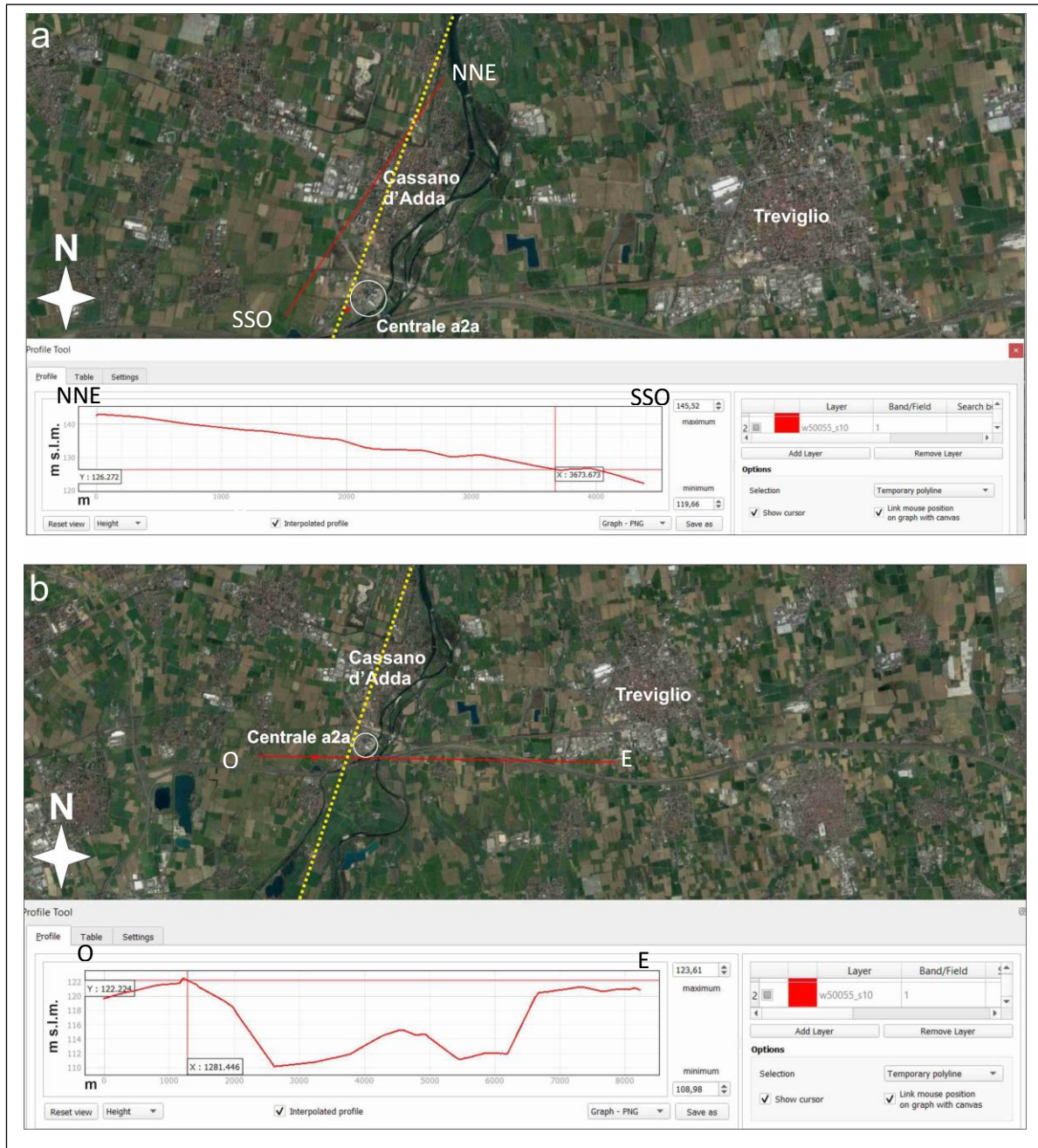


Fig. 9. a, b: Profili topografici (le tracce sono indicate dalle linee rosse) nell'area oggetto di studio; la linea tratteggiata gialla indica la traccia della faglia capace di ITHACA ID 87009.

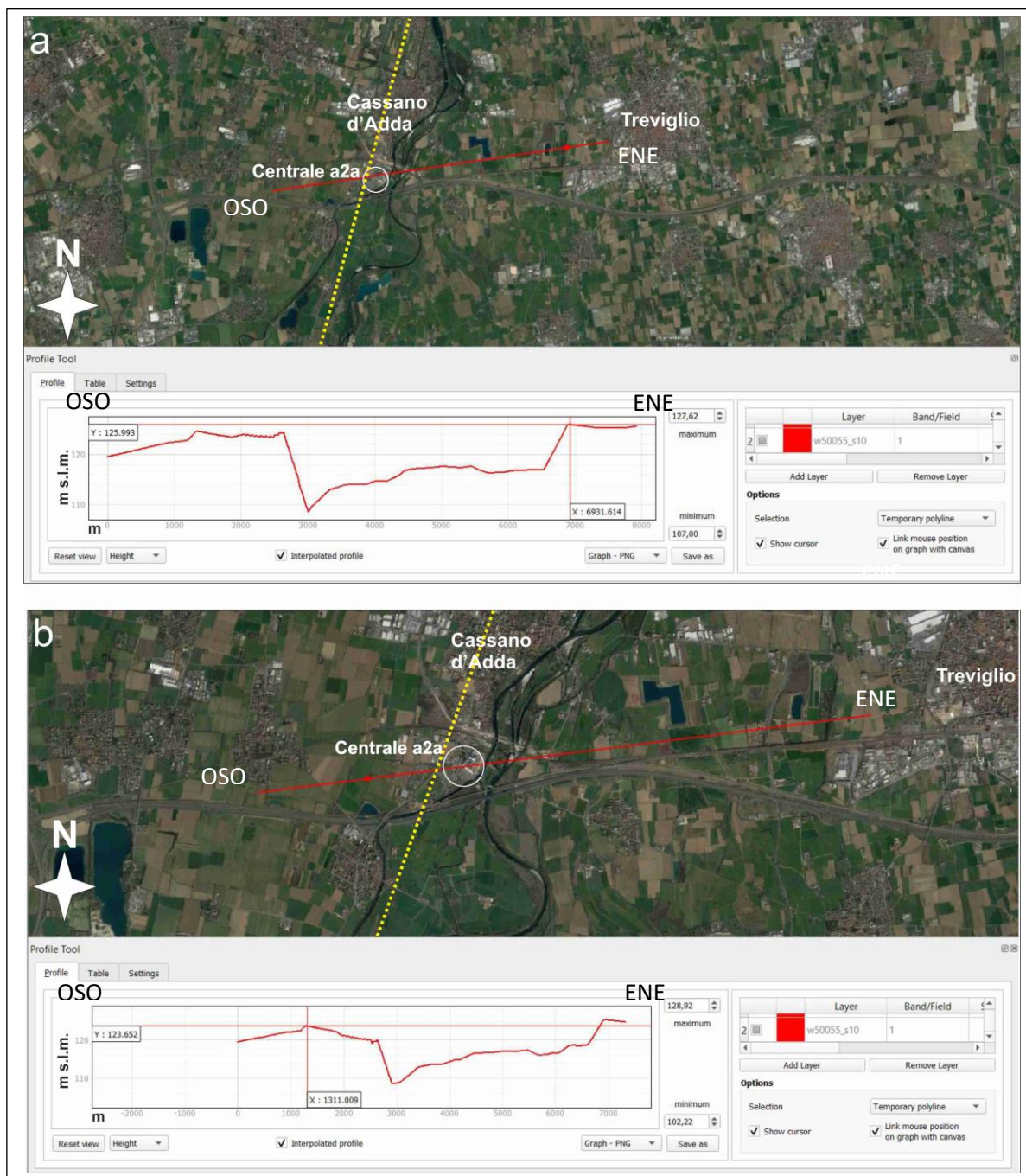


Fig. 10. a, b: profili topografici (le tracce sono indicate dalle linee rosse) nell'area oggetto di studio; la linea tratteggiata gialla indica la traccia della faglia capace di ITHACA ID 87009.

Alla scala più locale, l'interpretazione aerofotogeologica e l'analisi di modelli digitali di terreno (DEM) ad alta e altissima risoluzione (Tinitaly DEM, risoluzione a 10 m, e modelli prodotti con dati LIDAR, risoluzione a 1 m, forniti dal Ministero dell'Ambiente, www.pcn.minambiente.it) hanno

consentito l'osservazione delle caratteristiche geomorfologiche locali e l'analisi dell'evoluzione del paesaggio nella zona nelle ultime decine di anni.

In dettaglio, è possibile osservare la presenza di diverse zone localmente elevate e depresse rispetto alla superficie del sopradescritto terrazzo nell'area attorno alla centrale a2a, che corrispondono a zone in cui sono stati creati piccoli rilievi con accumulo di materiale di riporto, le prime, e in cui è stata effettuata attività estrattiva, le seconde. Sono zone con margini molto netti e squadrati, molto limitati come sviluppo planimetrico, che indicano chiaramente un'origine non riferibile a processi naturali (Fig. 11).



Fig. 11. Modello digitale di terreno da dati LIDAR della zona della centrale a2a. Sono visibili zone depresse e zone rilevate, che sono il prodotto dell'attività antropica nell'area. Il rettangolo rosso indica la traccia della trincea paleosismologica effettuata (si veda testo per la descrizione).

L'area compresa fra la centrale a2a e la stazione di Cassano d'Adda, selezionata per la realizzazione dell'indagine paleosismologica descritta nel paragrafo successivo, mostra evidenze di essere stata interessata da attività estrattiva, individuabili mediante l'osservazione delle immagini aeree del 1954 e del DEM da dati LIDAR (Figg. 11, 12, 13)

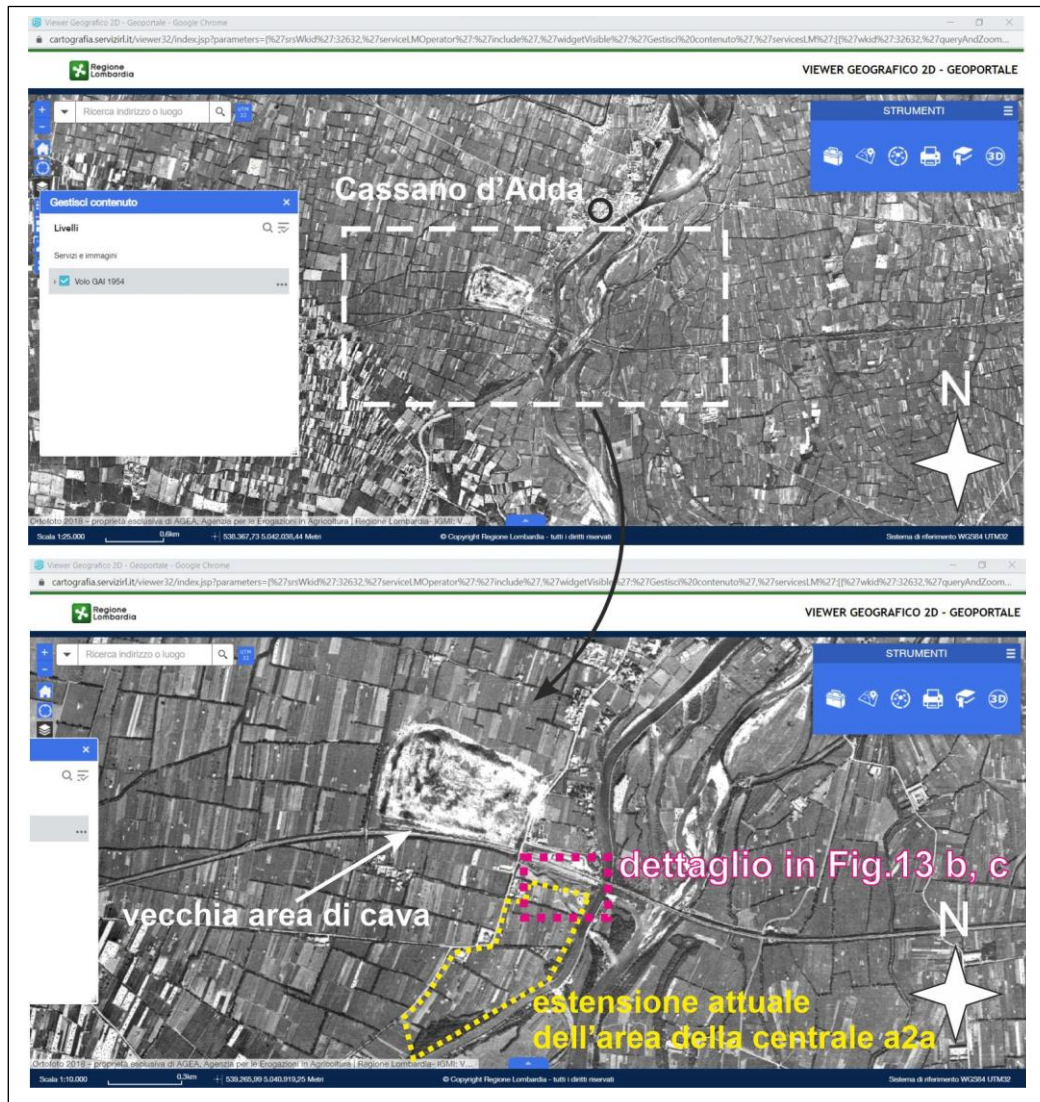


Fig. 12. Stralcio di immagine aere del 1954 dell'area di Cassano d'Adda (<https://www.geoportale.regione.lombardia.it/>; ultimo controllo di disponibilità maggio 2022)

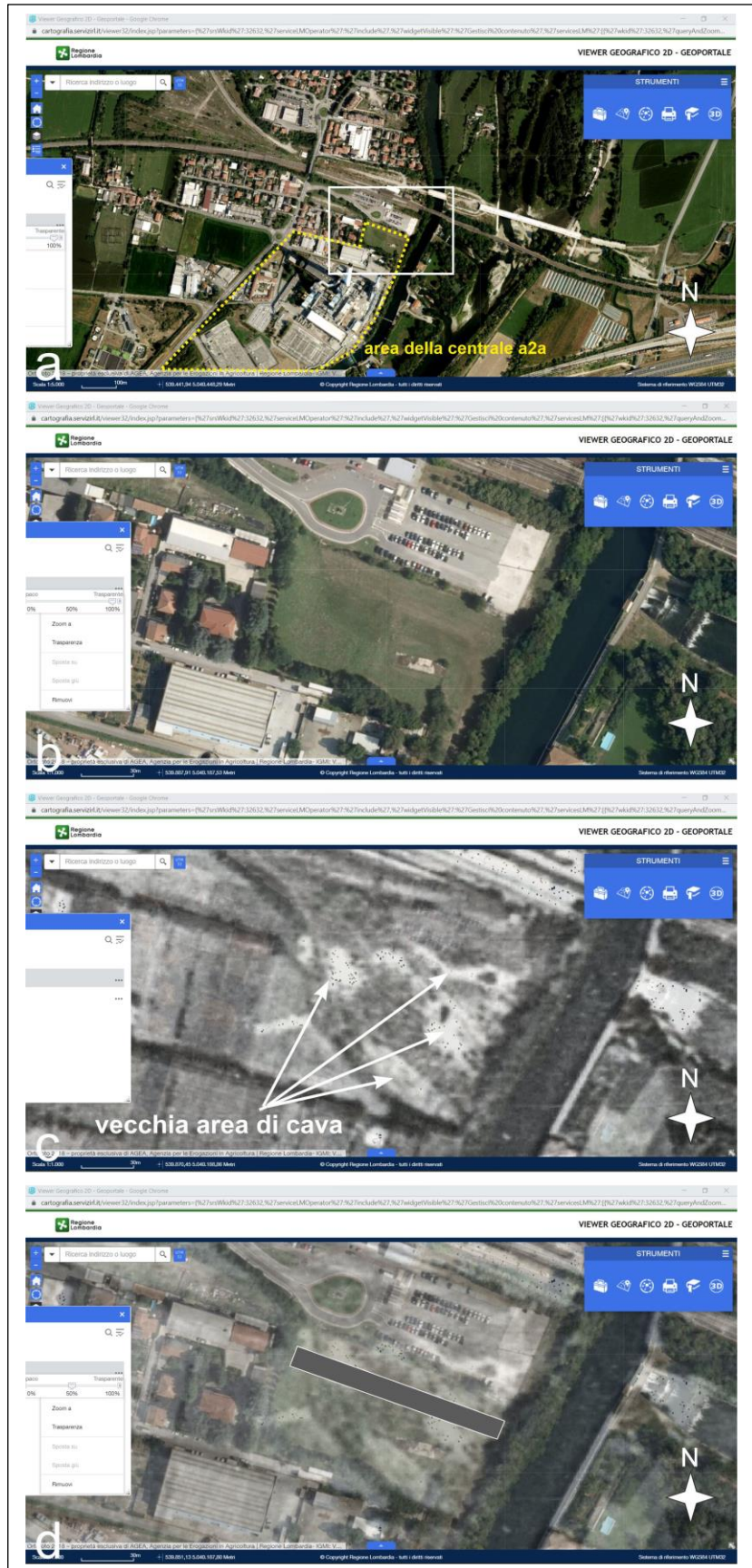


Fig. 13. a: Immagine satellitare dell'area di Cassano d'Adda (il rettangolo bianco è il dettaglio riportato in 'b'). b: Immagine aerea della zona in cui è stata effettuata l'indagine paleosismologica compresa fra la centrale a2a e la stazione ferroviaria di Cassano d'Adda. c: Stralcio della fotografia aerea del 1954 dell'area riportata in 'b', in cui sono visibili

le tracce delle attività estrattive nell'area. d: sovrapposizione della fotografia aerea del 1954 e dell'immagine satellitare attuale del sito; il rettangolo grigio indica la traccia della trincea paleosismologica.

Inoltre, come osservabile dall'ortofoto del 1975, la medesima area ospitava una piccola tratta ferroviaria, a tracciato curvilineo, che collegava la zona dell'attuale centrale con la ferrovia principale (Fig. 14).



Fig. 14. Ortofoto del 1975 dell'area a nord della centrale in cui è visibile il piccolo tracciato ferroviario. Il rettangolo rosso tratteggiato indica la traccia della trincea paleosismologica.

Nel complesso, quindi, queste osservazioni indicano che l'area della centrale e i settori limitrofi sono stati interessati da modifiche antropiche nel corso almeno degli ultimi decenni. A queste è riferibile anche l'origine della piccola scarpata che borda a ovest il sito oggetto dell'indagine paleosismologica, la cui estensione laterale è estremamente limitata (poche decine di metri) e che è stata comunque oggetto delle indagini sotto descritte. Pertanto, almeno per il sito oggetto dell'indagine, non sono individuabili elementi geomorfologici potenzialmente associabili alla presenza di una faglia capace. La morfologia dell'area sembra risultare dalla modifica della superficie del terrazzo sul quale sorge l'abitato di Cassano d'Adda per l'attività antropica.

6.2 Indagine paleosismologica

È stato realizzato mediante mezzo meccanico uno scavo in un'area appena a nord della centrale, in accordo con la committenza, all'interno di un terreno adiacente all'impianto (Fig. 15).

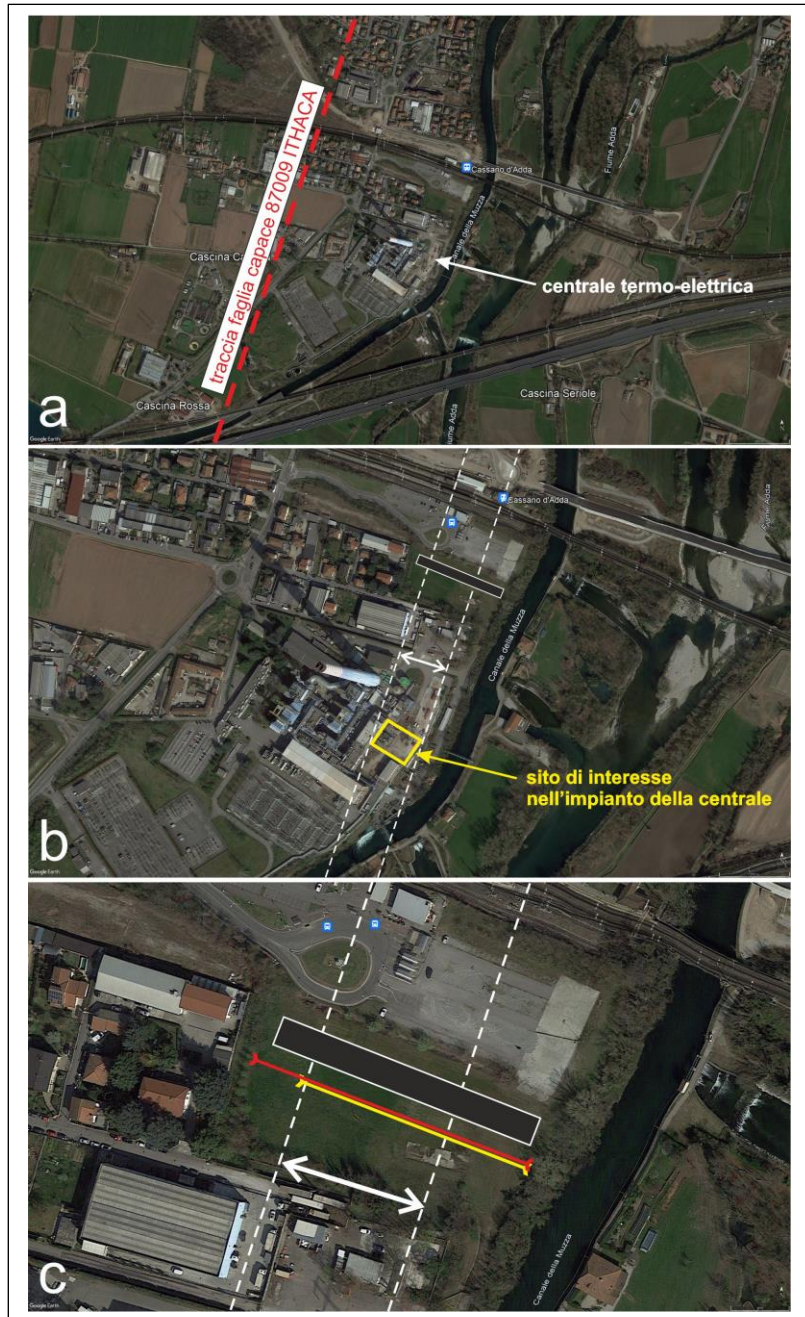


Fig. 15. a, b, c: Immagine satellitare della zona della centrale a2a. Le linee bianche tratteggiate e la doppia freccia bianca indicano l'estensione dell'area della centrale da investigare per la finalità del presente lavoro. Il rettangolo nero indica la traccia della trincea paleosismologica. Le linee gialla e rossa indicano le tracce delle indagini geofisiche descritte nel testo.

Il sito è stato selezionato considerando e conciliando le esigenze conoscitive specifiche dell'indagine e le esigenze logistiche. Il sito è infatti adiacente alla centrale, per cui le caratteristiche geologiche di sottosuolo sono rappresentative e significative di quelle della zona di interesse all'interno dell'impianto. Sulla base dell'analisi aerofotogeologia, dei modelli digitali di terreno e delle caratteristiche morfologiche attuali, il terreno in cui è stato ubicato lo scavo era quello in cui c'era la

maggior probabilità di intercettare terreni naturali, in modo da verificare la possibile dislocazione ad opera della faglia capace di terreni di natura sedimentaria. Come detto in precedenza, si sottolinea che il sito della centrale e le aree adiacenti sono state interessate in passato da forte attività antropica. Il terreno selezionato per l'indagine paleosismologica sembra essere stato interessato da attività estrattiva e successivo accumulo antropico di materiale (Figg. 13, 14). Questo da un lato ha suggerito la presenza appena al di sotto del piano campagna di terreni naturali oggetto di estrazione, dall'altro ha suggerito la probabile presenza di materiali di riporto al di sopra di quello naturale.

Inoltre, l'accessibilità e la dimensione planare del terreno ha permesso la realizzazione di uno scavo con un'ampiezza sufficiente da permettere di operare in sicurezza al suo interno per le esigenze analitiche e, in particolare, con una lunghezza adeguata allo scopo del lavoro.

A tale proposito, le linee tratteggiate bianche riportate in figura 15 delimitano l'estensione dell'area oggetto di analisi (indicata dalla doppia freccia bianca in Fig. 15b, c), proiettando la ipotetica traccia della faglia capace in corrispondenza del sito di interesse (mantenendo la direzione rispetto al nord della faglia riportata in ITHACA) e la possibile intersezione con il sito di interesse all'interno dell'area della centrale. La trincea geognostica è stata realizzata con una lunghezza anche maggiore della fascia delimitata dalle linee tratteggiate in modo da comprendere, cautelativamente, possibili variazioni di alcuni gradi della direzione della faglia rispetto a quella riportata in ITHACA.

Lo scavo è stato effettuato per una lunghezza di circa 120 m, larghezza massima di circa 10 m e profondità di circa 3.5 m, in alcuni settori fino a 5 m di profondità. Lo scavo è stato orientato in direzione circa ONO-ESE, ortogonalmente rispetto alla traccia della presunta faglia in modo da poter intercettare l'ipotetica dislocazione dei terreni ad opera di questa (Fig. 16).



Fig. 16. Fotografia della trincea paleosismologica (vista verso ONO) realizzata a ridosso della centrale a2a.

In sezione, la parete meridionale è stata realizzata a gradinata, mentre quella settentrionale a gradinata e obliqua, secondo lo schema riportato in Fig. 17. Tale configurazione è stata scelta per conciliare necessità tecnico-scientifiche e di sicurezza.

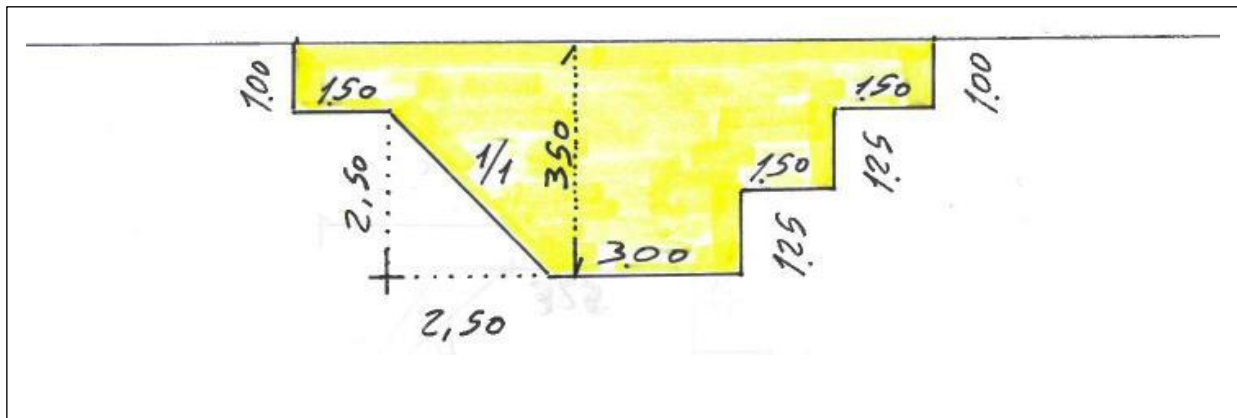


Fig. 17. Sezione tipo di realizzazione della trincea geognostica.

Per una corretta analisi stratigrafica delle pareti dello scavo, queste sono state pulite mediante l'impiego di utensili utili alla rimozione di materiale risultante dalle attività del mezzo meccanico. In settori selezionati dello scavo si è provveduto a realizzare un reticolo di riferimento, con fili e chiodi, al fine di rilevare in dettaglio le caratteristiche stratigrafiche dei terreni esposti e rappresentarle alla scala 1:20, a supporto delle osservazioni effettuate.

6.2.1 Analisi stratigrafica

Lo scavo ha esposto una sequenza stratigrafica costituita da terreni naturali e soprastanti terreni di riporto. L'analisi delle pareti dello scavo ha infatti evidenziato la presenza di profondi tagli antropici all'interno della sequenza naturale, associati alla succitata attività estrattiva, e la ricopertura di questi con terreni di riporto (Fig. 18; Materiale ausiliario).

Sono state distinte due unità stratigrafiche principali, qui di seguito descritte dalla più antica alla più recente.

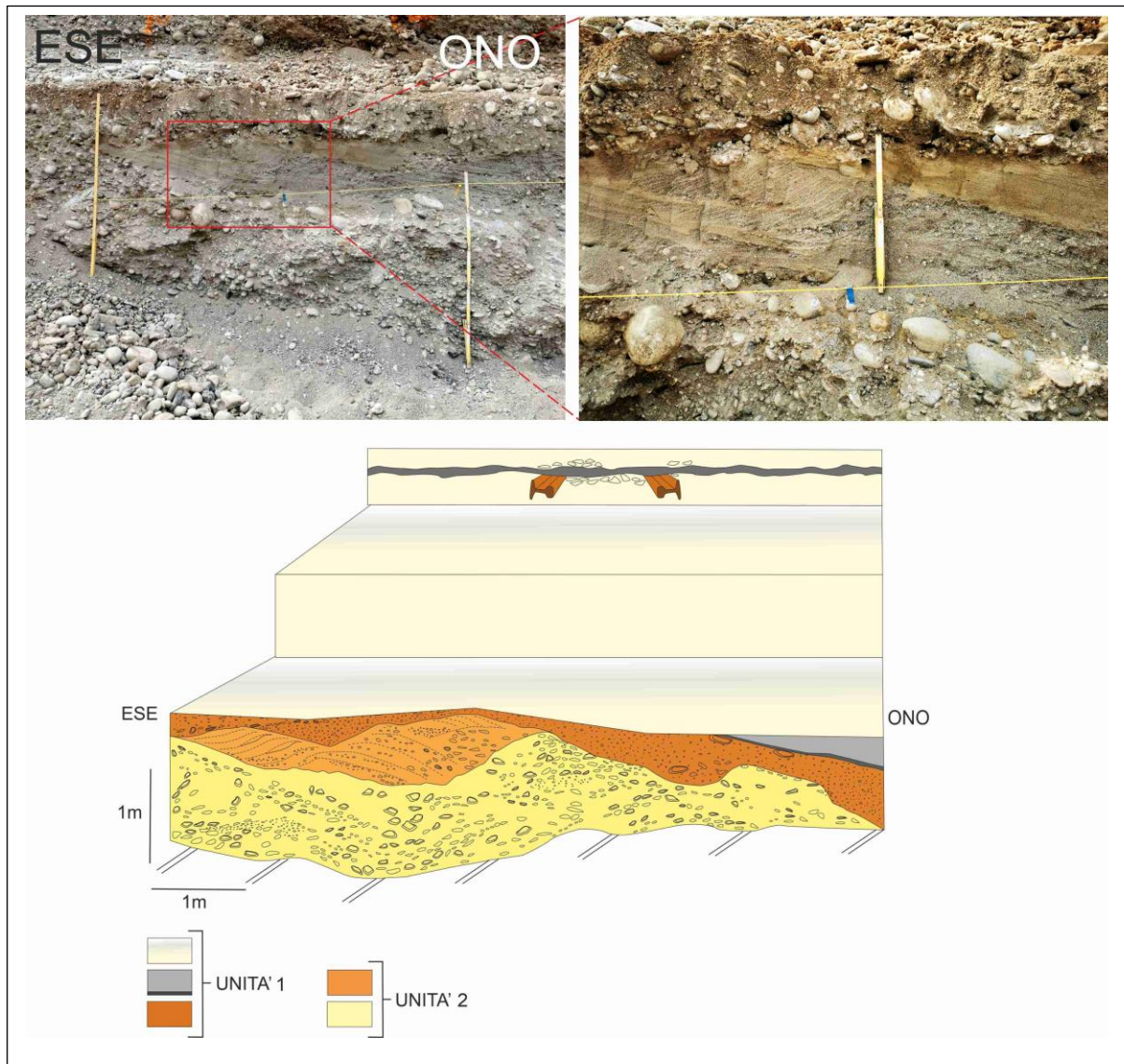


Fig. 18. Schema stratigrafico della parete della trincea paleosismologica e dettaglio fotografico delle ghiaie e sabbie alluvionali che compongono l'unità 2 (vedi testo per i dettagli).

Unità 2: è l'unità stratigraficamente più bassa esposta dallo scavo. È rappresentata da un deposito naturale costituito da un'alternanza di ghiaie e sabbie, organizzate in bancate e strati potenti da pochi centimetri a circa un metro, con giacitura sub-orizzontale e piano-parallela. Gli orizzonti ghiaiosi sono costituiti da ciottoli da arrotondati a sub-arrotondati, di dimensioni che arrivano a 15-20 cm di diametro, con grado di classatura variabile, e gradazione sia diretta che inversa. La matrice della ghiaia è costituita da ghiaia fine o sabbia. I ciottoli sono poligenici, rappresentati da rocce intrusive acide e basiche, rocce metamorfiche (gneiss), rocce carbonatiche (calcari e dolomie), rocce terrigene e selci (Fig. 19). I clasti sono a luoghi embricati, a giacitura tendenzialmente orizzontale piano-parallela.

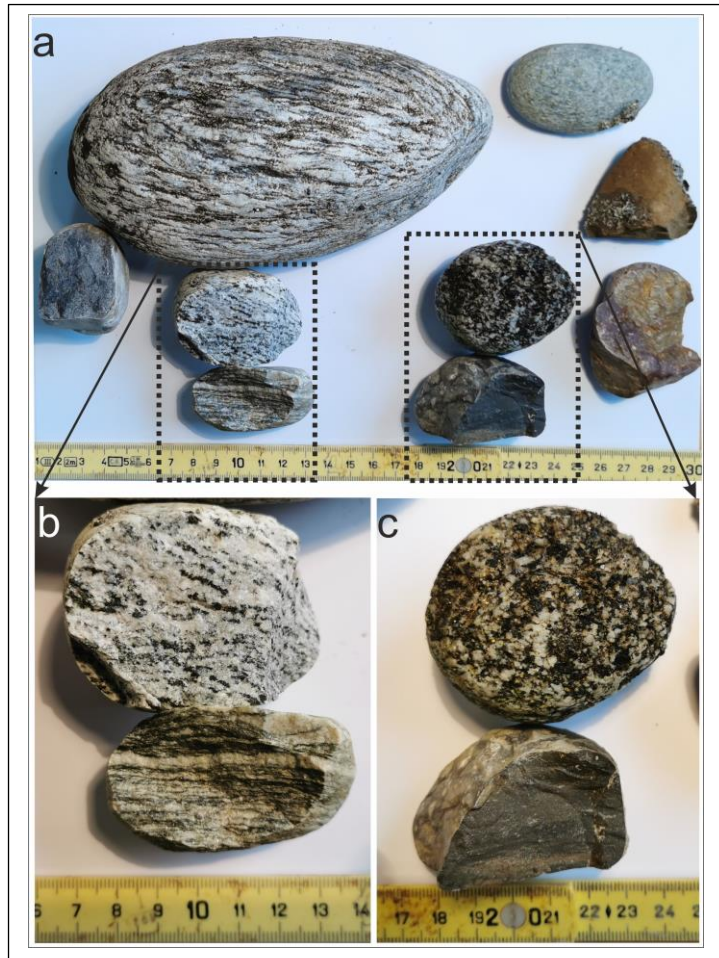


Fig. 19. a, b, c: Campioni di ciottoli che compongono la parte ghiaiosa dell'unità alluvionale 2.

Gli orizzonti più fini presentano delle locali forme canalizzate, con evidenti clinostratificazioni e laminazione incrociata. La parte ghiaiosa dell'unità presenta una locale cementazione, con un cemento di natura carbonatica, che probabilmente costituisce un orizzonte calcareo legato alla circolazione dell'acqua superficiale o all'oscillazione di un antico livello di falda. Nel complesso, trattasi di un'unità di origine alluvionale con strutture a canali intrecciati (Fig. 18).

L'assenza di materiale organico all'interno dell'unità ha impedito la collocazione per via radiometrica di questa unità in un determinato ambito temporale. Tuttavia, le caratteristiche sedimentologiche, litologiche e stratimetriche, nonché l'analisi critica delle conoscenze geologiche e geomorfologiche dell'area, descritte nei paragrafi precedenti, permettono di attribuire tale unità alluvionale all'*Unità di Cantù* (Carta Geologica della Provincia di Bergamo, 2000), attribuita al Pleistocene Superiore, in particolare all'Ultimo Massimo Glaciale (25-15 ka). Infatti, le sopradescritte caratteristiche dell'unità sono del tutto affini a quelle dell'*Unità di Cantù*. Va peraltro notato che tali caratteristiche non sono compatibili con il *Complesso del Brembo*, ovvero l'unità stratigrafica precedente all'*Unità di Cantù*, né con le unità post-glaciali le quali, a valle della confluenza dei fiumi Adda e Brembo (dove è ubicato

il sito di interesse), mostrano un dominio petrografico brembano (Carta Geologica della Provincia di Bergamo, 2000) diverso da quello dell'*Unità di Cantù*.

Tale attribuzione crono-stratigrafica è compatibile con quanto riportato nel Piano di Governo del Territorio che indica la presenza dell'*Unità di Cantù* in corrispondenza del sito della centrale **a2a**.

Unità 1: questa è costituita dal complesso dei terreni di riporto che ricoprono l'unità 2. Il limite inconforme fra le due unità è evidentemente ascrivibile ad attività antropica, rappresentata da tagli, escavazioni ed evidenti tracce di asportazioni di materiale, e successiva copertura con terreni di riporto. Tale unità antropogenica è costituita da una sequenza di materiale misto, composto da clasti e ciottoli provenienti dall'unità sottostante, frammenti di laterizi e ceramici (Fig. 20), nonché materiale di risulta di attività antropica, in matrice sabbiosa ad abbondanza estremamente variabile.

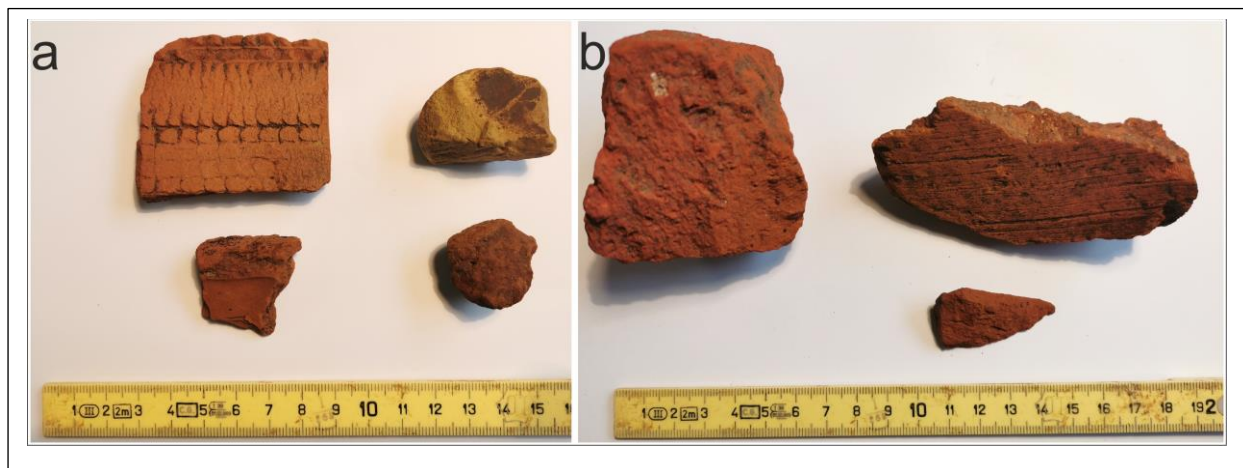


Fig. 20. a, b: Frammenti di materiale ceramico rinvenuti all'interno dell'unità antropica 1.

In particolare, la parte più alta dell'unità antropica (unità 1a) presenta abbondanti frammenti di materiale metallico sparsi, resti di sottoservizi non più in uso, manufatti di calcestruzzo e cemento armato e le tracce di un vecchio tracciato ferroviario che interessava quest'area e in uso nei passati decenni, almeno nella seconda metà del secolo scorso, visibile delle fotografie aeree analizzate. L'unità antropica mostra diverse fasi di accumulo di materiale di riporto, testimoniate dall'alternanza di livelli e strati distinguibili per caratteristiche stratimetriche e stratigrafiche. Questo indica una storia polifasica dell'attività antropica nel sito. L'analisi di alcuni frammenti di materiale fittile ritrovati nella parte più bassa dell'unità indicano che l'inizio dell'accumulo del materiale sia da riferirsi probabilmente a un'età post-romana.

Nel complesso, dunque, la stratigrafia esposta dalla trincea risulta coerente con quella attraversata dai sondaggi effettuati nell'area della centrale e descritta in precedenza, con la sovrapposizione di materiale di riporto su sedimenti naturali alluvionali (Fig. 21).

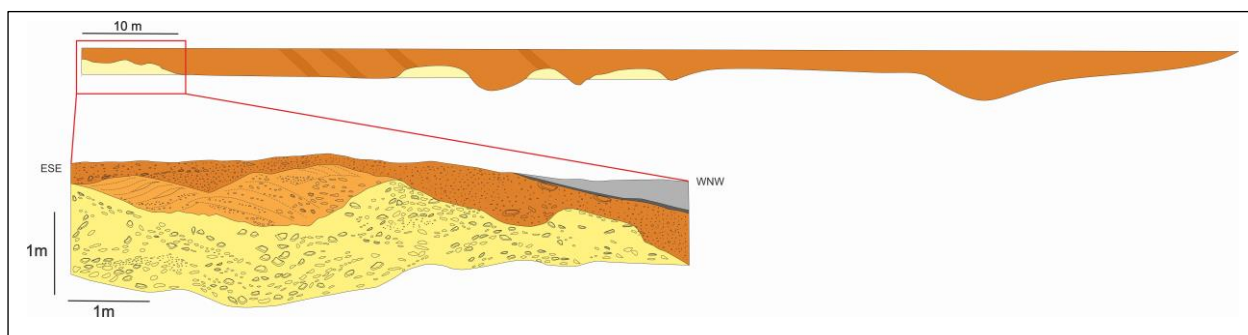


Fig. 21. Schema stratigrafico dell'intera trincea paleosismologica (per il dettaglio e la legenda si veda la figura 18).

6.2.2 Analisi stratimetrica in prospettiva geologico-strutturale

L'analisi delle pareti della trincea ha permesso di raccogliere informazioni utili a valutare la presenza di superfici di rottura nelle unità stratigrafiche esposte riconducibili a dislocazioni per effetto dell'attività della faglia capace ipotizzata. In primo luogo, va osservato che l'unità alluvionale 2 è stata esposta in modo abbastanza continuo per una estensione planimetrica di circa 66 metri lungo lo scavo, a partire dal limite orientale della trincea. La profondità alla quale questa unità è stata intercettata dalla trincea è di circa 3-3.5 m dal piano campagna, al di sotto dell'unità 1. Andando verso l'estremo orientale dello scavo, il limite stratigrafico fra l'unità 2 e i soprastanti riporti antropici diventa progressivamente, anche se di poco, più superficiale, risultando a circa 2 m di profondità dal piano campagna. Questo è dovuto alla variabilità locale nell'asportazione antropica del materiale che compone l'unità alluvionale (e successiva copertura con terreno di riporto).

La continuità laterale del corpo sedimentario alluvionale in trincea, interrotta localmente soltanto da tagli e scavi antropici di varia ampiezza riempiti dal materiale di riporto, è particolarmente evidente specialmente per ciò che concerne l'orizzonte ghiaioso che mostra il sopradescritto principio di cementazione (Fig. 22).



Fig. 22. Fotografia della trincea paleosismologica. La linea gialla tratteggiata indica la parte alta esposta dell'unità alluvionale 2, che risulta continua per circa 66 m all'interno dello scavo.

Inoltre, nelle porzioni dell'unità 2 esposte dallo scavo non sono state individuate evidenze di dislocazioni, di piani di taglio testimoniati da locale riorganizzazione geometrico-giacitura secondaria (ovvero, acquisita successivamente alla loro deposizione primaria) dei ciottoli del corpo alluvionale (es. ciottoli verticalizzati), né strati localmente basculati o piegati, tutti elementi che possano indicare la presenza di una o più superfici di rottura riconducibili alla presenza di una faglia capace, almeno per i 66 m di lunghezza di esposizione dell'unità 2 all'interno dello scavo. L'unità 2 mostra geometrie e giacitura primarie, associate solo al meccanismo di sedimentazione del corpo sedimentario.

Per la restante porzione dello scavo, dalla zona centrale di questo verso l'estremo occidentale, l'esposizione della sola unità antropica 1, fino a profondità che localmente hanno raggiunto almeno i 5 metri dal piano campagna (vedi materiale ausiliario), ha impedito osservazioni dirette circa la presenza o l'assenza di dislocazioni imputabili alla presenza di faglie capaci dell'unità 2. Per tale motivo, al fine di ottenere informazioni da confrontare con le osservazioni dirette fatte nello scavo, è stata effettuata una campagna di indagini geofisiche, segnatamente prospezioni geoelettriche, descritte nel paragrafo successivo, cui dettagli tecnico-operativi sono riportati nella Relazione Tecnica IMAG-70-A53-70-CRT00001, prodotta dallo studio GEODRILL s.r.l. – Dott. Geol. Marco Belloli . Queste hanno avuto lo scopo di fare valutazioni circa la possibile presenza di dislocazioni anche nella porzione dell'area in cui lo scavo non ha esposto terreni naturali. E' inoltre importante rilevare che la piccola scarpata presente al limite occidentale dell'area oggetto dell'indagine

paleosismologica è interamente scolpita sul terreno di riporto, come esposto nello scavo, definendo l'origine antropica di questo elemento morfologico locale, frutto delle succiate modifiche del paesaggio locale per le attività di asportazione di materiale naturale e accumulo artificiale di materiale.

6.3 Prospezioni geoelettriche

Le prospezioni geoelettriche di resistività si basano, in generale, sugli effetti sotterranei di una corrente elettrica, rilevabili in superficie attraverso misure di differenza di potenziale o intensità di corrente. La Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) è una tecnica d'indagine in cui la distribuzione della resistività del sottosuolo viene calcolata attraverso un gran numero di misurazioni fatte dagli elettrodi posti sulla superficie del terreno e allineati lungo un profilo (con interfaccia elettrodica dipendente dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richiesta). Sono stati eseguiti n. 2 profili di tomografia elettrica con lo scopo di mappare la distribuzione della resistività del sottosuolo lungo sezioni 2D parallele alla trincea paleosismologica ed identificare l'eventuale presenza di contrasti elettrici sia verticali che sub-orizzontali riconducibili a potenziali strutture tettoniche sepolte. L'esecuzione dell'indagine geoelettrica in concomitanza con quella paleosismologica ha permesso di avere osservazioni dirette circa le caratteristiche litologiche e stratigrafiche dei primi metri di sottosuolo in modo da "calibrare" in termini interpretativi il risultato della prospezione geofisica.

Da un punto di vista del metodo, la resistività è una grandezza fisica, misurata in Ωm (ohm * metro), posseduta dai materiali che indica la resistenza incontrata dalla corrente elettrica nell'attraversarli. La distribuzione dei valori di resistività dipende da numerosi fattori sia geologici sia idrogeologici sia geotecnici, come ad esempio variazioni litologiche, differente grado di compattazione dei terreni, porosità e contenuto in acqua.

Le configurazioni elettrodiche adottate per l'acquisizione di dati di resistività elettrica sono il "Dipolo-Dipolo" e il "Wenner-Schlumberger", in modo da risolvere efficacemente sia variazioni verticali che sub-orizzontali ad alta risoluzione e con una profondità di investigazione adeguata al problema in esame. Queste differiscono principalmente in relazione al potere risolutivo, profondità di investigazione, copertura orizzontale e stabilità del segnale. Il metodo Dipolo-Dipolo, in particolare, ha modesta capacità di penetrazione, bassa risoluzione verticale, ma buona risoluzione orizzontale (capacità elevata nel discriminare strutture verticali come faglie, dicchi, cavità etc.). Infatti, il dispositivo Dipolo-Dipolo è particolarmente sensibile alle strutture verticali al di sotto del centro dello stendimento, pertanto esso risulta essere adeguato al target ricercato, ossia quello di voler individuare strutture che provocano forti discontinuità orizzontali di resistività.

Sono stati effettuati due profili paralleli, come mostrato in figura 23, di lunghezza e risoluzione diverse da parte dello studio GEODRILL s.r.l. – Dott. Geol. Marco Belloli. Per un maggiore dettaglio si è proceduto all'esecuzione di uno profilo con spaziatura degli elettrodi di 2 m e lunghezza di 94 m ed uno con spaziatura di 3 m e lunghezza di 124 m. Gli stessi sono stati disposti sul medesimo allineamento. La strumentazione utilizzata è il georesistivimetro 16GS24 della PASI, cavi a 48 elettrodi, alimentazione tramite batteria da 12 Volt. Lo stendimento da 124 m ha interessato anche la piccola scarpata che delimita a ovest l'area oggetto dello studio, con una differenza di quota di circa 7 m fra i due estremi dello stendimento. Per lo stendimento da 94 m, la differenza di quota tra i due estremi è di circa di 1 m.

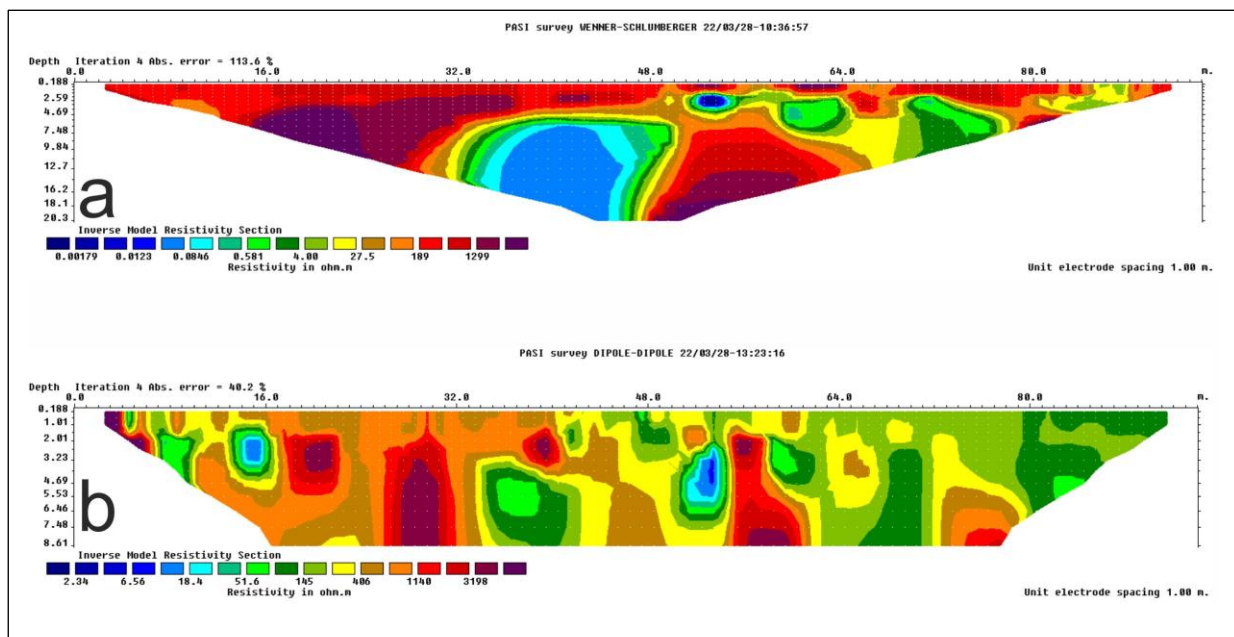


Fig. 23. Profili tomografici di 94 m delle indagini di resistività elettrica effettuate nell'area in esame. Configurazioni elettrodeiche Wenner-Schlumberger in 'a' e "Dipolo-Dipolo" in 'b'.

6.3.1 Risultati analitici

Entrambe le ERT mostrano una certa eterogeneità della resistività, con marcate variazioni laterali e verticali di questa. Come detto in precedenza, quelle laterali vengono meglio messe in evidenza dall'acquisizione nella configurazione Dipolo-Dipolo, mentre quelle verticali dalla configurazione Wenner-Schlumberger. In entrambe le sezioni sono visibili corpi a elevata resistività a contatto verticale e laterale netto con corpi a bassa resistività.

Grazie al confronto con l'osservazione diretta della stratigrafia di sottosuolo esposta dalla trincea geognostica, è possibile chiarire che i corpi ad alta resistività coincidono spazialmente e per natura del deposito con l'unità alluvionale 2, mentre quelli conduttivi corrispondono con l'unità 1 in cui, come descritto sopra, abbondano resti di materiale metallico, quindi conduttivi.

In particolare, il profilo di lunghezza di 124 m e spaziatura degli elettrodi di 3 m, consentendo una maggiore profondità di investigazione, chiarisce ancora meglio la presenza di corpi resistivi nella porzione profonda, che corrispondono alla sequenza alluvionale dell'unità 2. La porzione superficiale, interessata da materiale riportato eterogeneo, è presente con spessore variabile e puntualmente con resistività molto bassa, probabilmente per la presenza di corpi conduttivi e/o sottoservizi. Nella figura 24 è marcato, a titolo indicativo, il limite verticale fra l'unità antropica 1 e quella resistiva di fondo costituita dall'unità alluvionale 2.

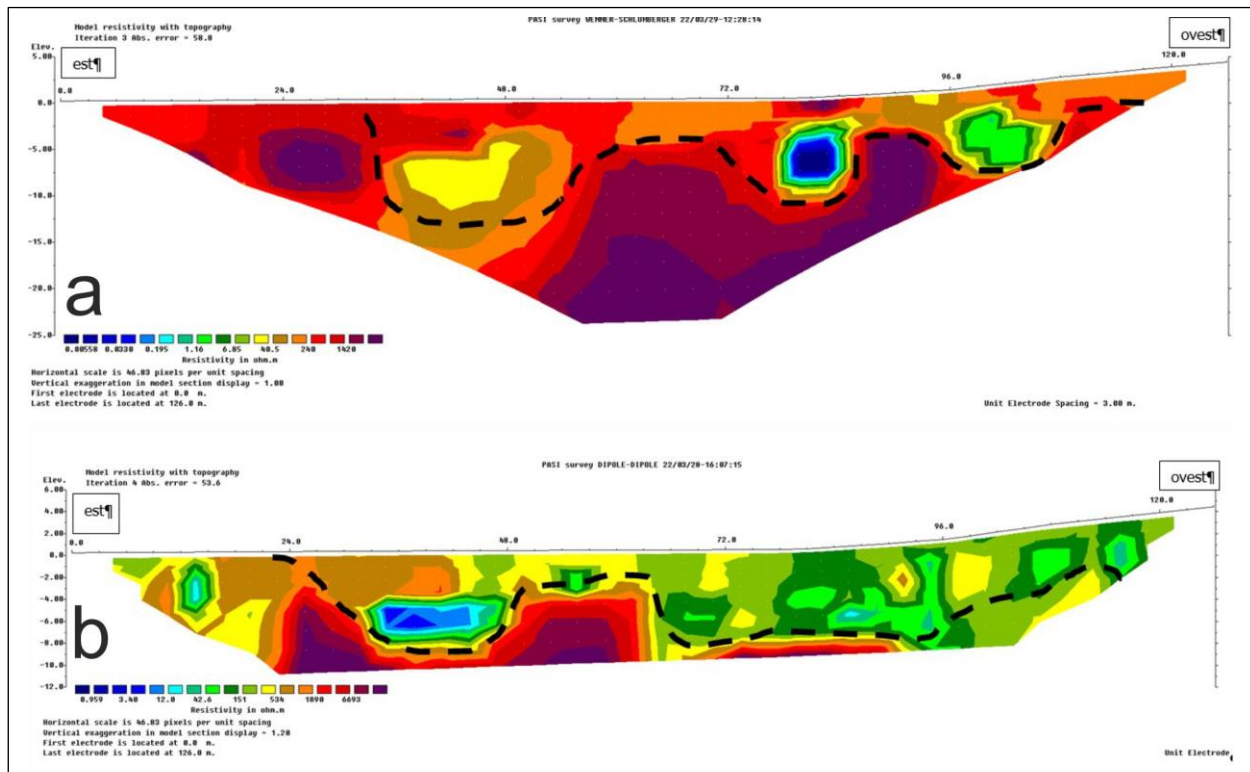


Fig. 24. Profili tomografici di 124 m delle indagini di resistività elettrica effettuate nell'area in esame. Configurazioni elettrode Wenne-Schlumberger in 'a' e "Dipolo-Dipolo" in 'b'. La linea nera tratteggiata marca indicativamente il limite fra l'unità alluvionale 2 e l'unità antropica 1.

Quindi, le indagini di resistività elettrica corroborano la continuità laterale dell'unità 2, a pochi metri di profondità dal piano campagna, per tutta la traccia delle sezioni ERT, anche nella porzione in cui la maggiore asportazione per cavatura del materiale alluvionale e il maggior accumulo del materiale di riporto non hanno consentito di intercettare nello scavo il corpo sedimentario naturale.

7. DISCUSSIONE DEI DATI RACCOLTI

7.1 Analisi delle informazioni disponibili circa la presenza della faglia capace n. 87009 del database ITHACA

Per ciò che riguarda specificatamente la faglia capace n. 87009 riportata sul database ITHACA, le informazioni fornite dai realizzatori del database, che costituiscono la base conoscitiva per l'individuazione e mappatura dell'elemento tettonico, risultano decisamente lacunose e di scarso dettaglio.

In primo luogo, le uniche due citazioni bibliografiche cui ITHACA fa riferimento, a supporto della presenza della faglia capace, non riportano la presenza di tale elemento tettonico (Fig. 25), né la bibliografia citata in questi due lavori riporta la presenza della struttura in oggetto. In secondo luogo, la scala di mappatura della faglia capace ("mapping scale" 1:500.000) definisce un dettaglio decisamente basso della sua ubicazione ed estensione.

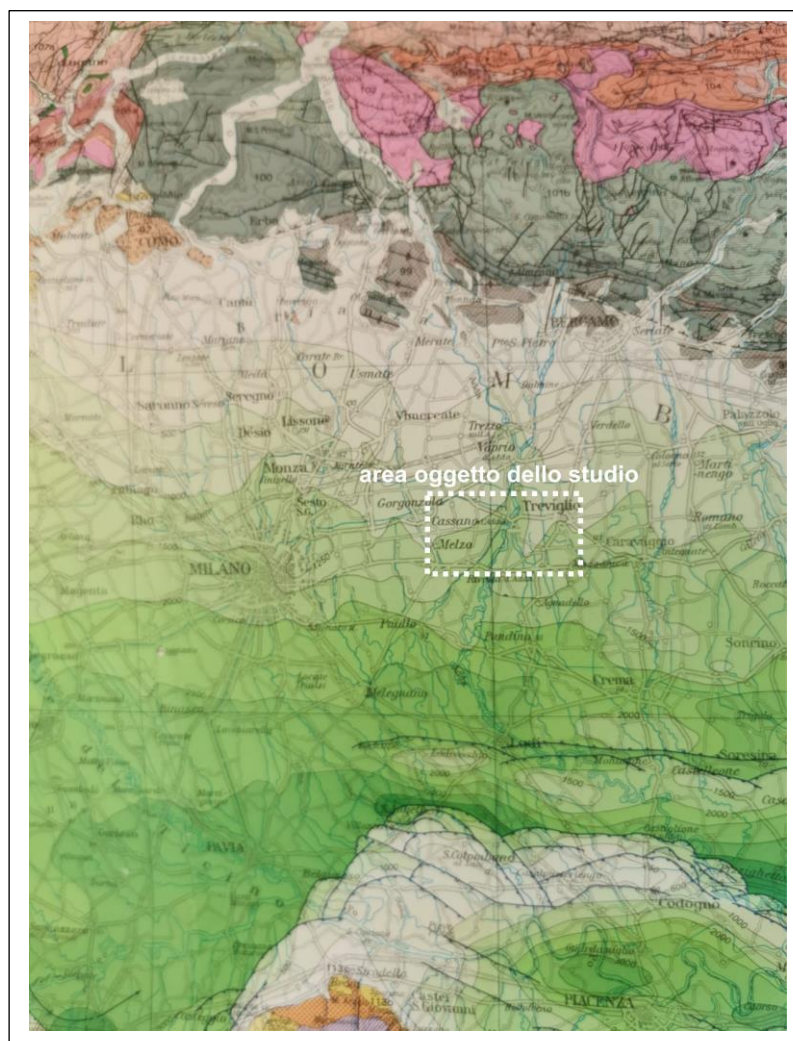


Fig. 25. Stralcio del Modello Strutturale d'Italia (AA.VV. 1983, Structural Model of Italy) dell'area della Pianura Padana in cui ricade Cassano d'Adda. Non sono visibili elementi strutturali nell'area oggetto di studio.

Questo comporta, intrinsecamente, una grande incertezza nella mappatura dell'elemento nonostante questo venga cartografato in ITHACA per una lunghezza di 11.8 km, ovvero con accuratezza alla prima cifra decimale. Non è dunque chiaro come tale lunghezza sia stata definita. Così come non sono forniti in ITHACA gli elementi che supportino la capacità della supposta faglia, alla quale viene riferita l'ultima attività a un generico Pleistocene. Non è neanche definito cosa i realizzatori del database intendano per “*geomorphic data*” (dati geomorfologici) nella sezione “*applied technique*” (tecnica applicata) e a quali dati geomorfologici facciano riferimento, poiché questi non sono esplicitamente indicati nella scheda descrittiva né nella bibliografia di riferimento. Nel complesso, dunque, non è chiaro su quali dati, sia originali sia ricavati da indicazioni bibliografiche, sia stata cartografata la faglia capace ID 87009 nel database ITHACA e gli sia stato assegnato il rango di “primario”.

In termini geomorfologici, peraltro, nel lavoro di Burrato et al. (2003), il tratto del fiume Adda compreso fra Cassano d'Adda, a nord, e Spino d'Adda, a sud, che mostra un andamento in pianta circa NNE-SSO, che risulterebbe quindi parallelo all'elemento tettonico in esame, è interpretato dagli autori come una anomalia del corso fluviale (chiamata dagli stessi “anomalia 6 - Rivolta d'Adda”) legata alla presenza di un'anticlinale con asse orientato circa E-O. La crescita di questa anticlinale avrebbe determinato la deflessione del fiume verso il quadrante occidentale. Tale anomalia non sarebbe pertanto legata dagli autori alla presenza di un elemento tettonico capace, al quale sono associabili piani di rottura della superficie topografica, bensì alla risposta di lungo termine del corso d'acqua alla progressiva crescita di una piega.

Dunque, l'analisi di tutta la letteratura disponibile per ciò che riguarda l'assetto sismotettonico dell'area suggerisce che la zona di Cassano d'Adda è posizionata al tetto di una sorgente sismogenetica (ID ITCS002, “*Western S-Alps external thrust deep*”) associata a una faglia inversa orientata da NO-SE a circa E-O, potenzialmente responsabile di eventi sismici di magnitudo fino a circa M_w 6.8 (DISS Working Group, 2021). Tale sorgente sismogenetica, tuttavia, sarebbe cieca, ovvero il piano di faglia non intercetterebbe la superficie topografica; la sua profondità minima è infatti indicata essere a 6 km dalla superficie. Peraltro, la proiezione teorica in superficie di questa sorgente sismogenetica risulterebbe diversi km a sud del sito oggetto di studio.

Nel complesso, quindi, non è chiaro su quali dati gli autori del database ITHACA abbiano individuato e caratterizzato dal punto di vista geometrico e cinematico la faglia capace n. 87009.

7.2 Analisi delle informazioni geologiche, geomorfologiche, paleosismologiche e geofisiche del presente studio

L'insieme delle informazioni raccolte nel presente studio indicano che:

1) il sito della centrale è ubicato al di sopra di un terrazzo fluviale (e di un corpo sedimentario) riferibile all'Ultimo Massimo Glaciale, presente in destra idrografica del fiume Adda. Questo terrazzo risulta essere alla stessa quota del suo corrispettivo in sinistra idrografica del fiume. Tale assetto geomorfologico areale chiarisce che il terrazzo non ha subito dislocazione verticali di lungo termine per l'attività di una faglia capace inversa ad andamento circa parallelo al fiume, così come è cartografata e definita dal punto di vista cinematico la faglia capace ID 87009 di ITHACA.

Le osservazioni geomorfologiche locali mostrano che il sito della centrale è stato oggetto di attività estrattiva e alterazioni antropiche della morfologia dell'area, con la formazione di piccole zone rilevate e zone depresse, delimitate da scarpate, la cui origine non è legata all'attività di lungo periodo di una faglia capace ma, appunto, all'attività antropica.

2) Le indagini paleosismologiche permettono di escludere la presenza di dislocazioni e piani di taglio associabili ad elementi di origine tettonica (come richiesto dalle prescrizioni) per un tratto lungo almeno 66 m del settore esaminato dalla trincea geognostica. Questo è testimoniato dalla continuità laterale dell'unità alluvionale 2 esposta dalla trincea e dall'assenza di evidenze strutturali che suggeriscono la presenza di piani di taglio fragili associabili alla presenza di una faglia capace. La continuità stratigrafica dell'unità 2 è interrotta soltanto da scavi antropici e da accumulo di materiale di riporto, che hanno alterato l'assetto stratigrafico naturale locale.

3) Le indagini di tomografia elettrica e i dati stratigrafici derivati dai sondaggi geognostici disponibili supportano le osservazioni effettuate nello scavo geognostico e consentono di estendere l'interpretazione paleosismologica a tutto il tratto oggetto del presente studio. Il confronto fra i risultati delle varie indagini corrobora il fatto che le variazioni di profondità del limite fra l'unità alluvionale 2 e l'unità antropica 1 e i contatti laterali fra le due unità sono ascrivibili all'attività antropica lungo tutta la sezione analizzata e non è possibile pertanto ipotizzare la presenza di dislocazioni tettoniche neanche nella porzione dello scavo geognostico in cui non è stato raggiunto il sedimento naturale alluvionale dell'unità 2.

8. CONCLUSIONI

L'insieme delle informazioni raccolte permettono dunque di escludere la presenza di dislocazioni fragili e piani di rottura associabili alla presenza nel sito preso in esame di una faglia capace almeno a partire dall'Ultimo Massimo Glaciale (ovvero da circa 25.000-15.000 anni) fino a oggi. Benché, come indicato nell'introduzione al presente studio, le Linee Guida FAC indichino che *“è considerata attiva una faglia che si è attivata almeno una volta negli ultimi 40.000 anni (parte alta del Pleistocene superiore-Olocene), ed è considerata capace una faglia attiva che raggiunge la superficie topografica, producendo una frattura/dislocazione del terreno”*, e benché non sia stato possibile individuare elementi cronologici che escludano dislocazione per l'intero lasso temporale proposto dalle Linee Guida FAC, è possibile considerare l'Ultimo Massimo Glaciale come un limite cronologico inferiormente sufficientemente lungo per escludere la capacità di un elemento tettonico, secondo quanto illustrato per il contesto tettonico italiano da Galadini et al. (2012). Gli autori, infatti, indicano che *“per il dominio tettonico compressivo, una faglia inversa o thrust (ciechi) dovrebbero essere considerati come attivi e potenzialmente capaci se mostrano evidenze di attivazione nel Quaternario, a meno che non vi siano evidenze di inattività a partire dall'Ultimo Massimo Glaciale (circa 20ka)”*. Questo è il caso del sito preso in esame, nel quale non vi sono dunque evidenze di dislocazioni fragili riferibili a una faglia capace almeno a partire dall'Ultimo Massimo Glaciale.

In aggiunta, è opportuno evidenziare che il limite cronologico inferiore relativo all'Ultimo Massimo Glaciale proposto da Galadini et al. (2012) si basa su criteri operativi sia “strumentali” che “geologici”: infatti, in termini “strumentali”, i depositi e le morfologie relative all'Ultimo Massimo Glaciale sono ubiquitari e, quindi, utili in termini di possibilità di identificare le tracce geologiche della capacità di una faglia, data la loro diffusione sui territori; in termini “geologici”, tale limite tiene conto dei tassi di movimento delle faglie attive e capaci. Invece, il limite cronologico inferiore dei 40.000 anni proposto nelle Linee Guida FAC tiene conto solo di un criterio operativo, che consiste nel limite dell'applicabilità del metodo di datazione radiometrica del ^{14}C .

BIBLIOGRAFIA

AA.VV. (1983). Structural Model of Italy. "Quaderni ""La Ricerca Scientifica"", 114 (3), 6 Fogli, CNR-PFG, Sottoprogetto Modello Strutturale Tridimensionale, Roma."

Basili R, Valensise G, Vannoli P, Burrato P, Fracassi U, Mariano S, Tiberti M.M, Boschi E. (2008). The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. *Tectonophysics*; doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014.

Burrato P, Ciucci F, Valensise G. (2003). An inventory of river anomalies in 1482 the Po Plain: evidence for active blind thrust faulting. *Annals of Geophysics* 46 (5), 865–882 1483.

Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000 Foglio 46 – Treviglio. ISPRA - Servizio Geologico d'Italia, Roma. Cartografia realizzata dal Servizio Geologico D'Italia Organo cartografico dello Stato (legge 2/2/1960 N. 68).

Carta Geologica della Provincia di Bergamo (2000). A cura di: Servizio Territorio della Provincia di Bergamo, Dipartimento di Scienza della Terra dell'Università degli Studi di Milano. Centro di studio per la Geodinamica Alpina e Quaternaria del CNR.

Casero P. (2004). Structural setting of petroleum exploration plays in Italy. Special Volume of the Italian Geological Society for the IGC 32 Florence-2004.

Castaldini D, Panizza M. (1991). Inventario delle faglie attive tra i fiumi Po e Piave e il lago di Como Italia settentrionale). *Il Quaternario* 4 (2), 333-410.

Commissione tecnica per la microzonazione sismica, Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC), versione 1.0 Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della protezione civile, Roma, 2015.

DISS Working Group (2021). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>

Galadini F, Falcucci E, Galli P, Giaccio B, Gori S, Messina P, Moro M, Saroli M, Scardia G, Sposato A. (2012). Time intervals to assess active and capable faults for engineering practices in Italy, *Engineering Geology* 139–140, 50–65.

Giardina F, Michetti A.M, Serva L, Doglioni C. (2004). The seismic potential of the Insubria Region (Southern Alps): insights from topographic and rheological modeling. *Boll.Geof.Teor.Appl.*, 45, 86-91

IAEA (International Atomic Energy Agency), 2010. *Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Chapter 8: Potential for Fault Displacement at the Site: Specific Safety Guide No. SSG-9*, ISBN . ISBN: 978-92-0-102910-2. STI/PUB/1448.

ITHACA Working Group (2019). ITHACA (ITaly HAZard from CAPable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx>

Livio F, Berlusconi A, Michetti AM, Sileo G, Zerboni A, Trombino L, Cremaschi M et al. (2009). Active fault-related folding in the epicentral area of the December 25, 1222 (Io = IXMCS) Brescia earthquake (Northern Italy): seismotectonic implications. *Tectonophysics*, 476, 320–335.

Piano di Governo e del Territorio (2019). *Relazione e le norme geologiche di Piano della Componente geologica, idrogeologica e sismica della Variante n.1 al PGT del Comune di Cassano d’Adda*. Microsoft Word - MI4053rl (cassanodadda.mi.it). Ultimo controllo di disponibilità il 13/05/2022.

Ravazzi R, Garozzo L, Deaddis M, De Amicis M, Marchetti M, Pini R, Vezzoli G, Zanchi A. (2018). Palaeoenvironment and vegetation history in the central po plain (N-Italy) between 33-30 ka cal. BP under the impact of millennial climate change. *Alpine and Mediterranean Quaternary*, Vol. 31 (Quaternary: Past, Present, Future - AIQUA Conference, Florence, 13-14/06/2018), 93 – 97.

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli, B., Gasperini P., Antonucci A., 2022. *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15)*, versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.4>

Scardia G, Festa A, Monegato G, Pini R, Rogledi S, Tremolada F, Galadini F. (2014). Evidence for late Alpine tectonics in the Lake Garda area (northern Italy) and seismogenic implications. *Geological Society of America Bulletin*, DOI: 10.1130/B30990.1

Stucchi M, Galadini F, Rovida A, Moroni A, Albini P, Mirto C, Migliavacca P. (2008). Investigation of pre-1700 earthquakes between the Adda and the middle Adige river basins (Southern Alps). In: J. Fréchet, M. Meghraoui, M. Stucchi (eds.), *Historical Seismology, Interdisciplinary Studies of Past and Recent Earthquakes*, Springer, 93-129. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8222-1_5

Vannoli P., Burrato P., Valensise G. (2015). The Seismotectonics of the Po Plain (Northern Italy): Tectonic Diversity in a Blind Faulting Domain. *Pure and Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0873-0>.

Zanchi A, Ravazzi C, Cavallin A, Deaddis M, De Amicis M, Arosio T, Marchetti M, Vezzoli G. (2021). Interplay of Holocene surface faulting and climate in the Central Po Plain, Italy. *Quaternary Research* (2021), 1–16. doi:10.1017/qua.2021.68

Zuffetti C, Bersezio R. (2020). Morphostructural evidence of Late Quaternary tectonics at the Po Plain-Northern Apennines border (Lombardy, Italy). *Geomorphology*, Volume 364.

MATERIALE AUSILIARIO

Fotografie della parete meridionale dello scavo paleosismologico, dalla progressiva 0 m alla progressiva 100 m.

